

GERMAINE BEISER

LA GRAVITATION

de COPERNIC à EINSTEIN



GERMAINE BEISER

LA GRAVITATION

de Copernic à Einstein

Illustrations de GEORGE H. BUEHLER

NOUVEAUX HORIZONS

S 124

1975

L'édition originale de cet ouvrage a été publiée par *E.P. Dutton & Co., Inc.*, New York, sous le titre : *The Story of Gravity. An Historical Approach to the Study of the Force That Holds the Universe Together.*

Traduction : Hugues DE LA CHESNERAYE.

Maquette de couverture : Jean-François BORREDON.

Copyright © 1968 by Germaine Beiser. Published in English by E.P. Dutton & Co., Inc., New York, and by Clarke, Irwin & Company, Ltd., Toronto.

INTRODUCTION

Il n'est pas facile d'étudier la gravitation, précisément parce qu'elle nous est trop familière. C'est la première force que vous avez ressentie, la première dont on vous a parlé à l'école, peut-être même dès le jardin d'enfants. Votre institutrice avait décidé que ses élèves devaient commencer tôt leur formation scientifique. « Qu'est-ce qui fait tomber les choses ? » demandait-elle. La « pesanteur », avez-vous dit fièrement, la face rayonnante. Votre institutrice, elle aussi, avait la face rayonnante, et vous estimiez tous les deux qu'il n'y avait plus rien à dire sur ce sujet. Il y a cependant beaucoup d'autres choses à apprendre au sujet de la gravitation comme vous le constaterez en lisant ce livre.

Bien que cela puisse sembler difficile à croire, toutes les forces actuellement connues des scienti-

fiques peuvent se diviser en quatre catégories fondamentales. Les deux premières ne vous surprennent pas : les forces gravifiques et les forces électromagnétiques. Les deux autres forces concernent d'autres interactions entre particules nucléaires ; on les appelle respectivement interaction forte, ou nucléaire, et interaction faible (il y a certes des forces chimiques, des forces musculaires, des forces mécaniques, etc., mais elles peuvent toutes se ramener aux quatre forces fondamentales). La gravitation est, de beaucoup, la plus faible des quatre.

Etudions maintenant cette force qui, quoique la plus faible, est cependant celle qui maintient la cohésion de l'univers.

CHAPITRE PREMIER

LE TRIOMPHE DU SOLEIL

Nous considérons comme évident que c'est la *même* force qui maintient les planètes sur leurs orbites et qui provoque la chute des corps. Cette certitude est récente. Pendant des centaines de milliers d'années, l'humanité a fait toutes sortes d'observations et de découvertes avant que quelqu'un établisse la relation — qui, en fait, n'était pas si évidente que ça — entre le mouvement sur la Terre et le mouvement dans l'espace. Ce fut Galilée qui, le premier, soupçonna l'existence d'une loi unique. Il donna la première équation de la gravitation, mais ne put en prouver la validité que sur la Terre. Plus tard, Isaac Newton parvint à réunir les lois du mouvement des planè-

tes de Johannes Kepler et les résultats de Galilée dans sa loi de la gravitation *universelle*.

Newton aurait-il pu arriver à ce résultat s'il avait vécu à une époque plus ancienne, où l'on croyait que la *Terre* était le centre de l'univers ? Il est fort douteux que même un aussi grand génie que lui ait pu débrouiller le labyrinthe de cercles tournant les uns autour des autres qu'employaient les premiers philosophes pour représenter le mouvement des planètes et parvenir à découvrir la gravitation, sous ce fatras. Un système héliocentrique (centré sur le Soleil) était nécessaire aux travaux de Newton. Pour retracer l'évolution de la théorie de la gravitation, nous devons remonter à une époque antérieure où l'existence de la gravitation en tant que force n'était même pas soupçonnée. Etudions la genèse de la théorie héliocentrique de Copernic.

Pythagore.

Toutes les civilisations primitives ont trouvé des explications pour le parcours suivi chaque jour par le Soleil à travers le ciel, pour le lent déplacement des étoiles qui les ramène à leur point de départ au bout d'un an et pour le vagabondage des planètes. Les dieux et les grands animaux

jouent des rôles importants dans ces explications qui, malheureusement, n'ont aucun intérêt pour notre étude. Nous commencerons notre histoire un peu plus tard, au VI^e siècle avant J.-C. A cette époque, la Grèce avait produit des penseurs qui, rejetant les dieux, cherchaient des explications fondées sur la pensée logique. L'un d'eux, Pythagore de Samos, avait fait de la mesure une sorte de religion. Il accordait tant d'importance aux nombres qu'il les soupçonnait d'être la base de l'univers ! Beaucoup de ses résultats étaient exacts — il est notamment l'auteur du théorème qui porte son nom — mais il tomba dans l'erreur, commune à tous les anciens Grecs, de croire que le raisonnement suffit pour atteindre la vérité. Cette attitude arrogante fut la cause de ses erreurs en astronomie. Les théories qu'il proposait étaient certes tirées d'une façon raisonnable et logique de ce qu'il voyait dans le ciel, mais, malheureusement, il n'en avait pas vu assez ; ses idées se fondaient sur des observations trop peu nombreuses et, pour la plupart, erronées. On est obligé, à regret, de dire que ses théories sur les mouvements célestes ne furent guère discutées pendant les vingt siècles qui suivirent. Pythagore avait rejeté l'idée que la Terre puisse être un cylindre sur le dessus plat duquel nous vivrions et suggéré que c'était une sphère flottant dans l'espace, mais ce

pas en avant était annulé par sa théorie d'après laquelle le Soleil tournait autour de la Terre en une année, tandis que *le ciel entier*, y compris le Soleil, porté par une sphère creuse, tournait autour de la Terre en un jour et une nuit. Le plan de la trajectoire du Soleil formait un angle par rapport à celui de la rotation du ciel (voir figure 1). Pythagore pouvait ainsi expliquer le lever et le coucher du Soleil et, à cause de l'angle dont il vient d'être question, il pouvait aussi expliquer la variation de l'emplacement sur l'horizon occupé par le Soleil au moment de son lever et de son coucher.

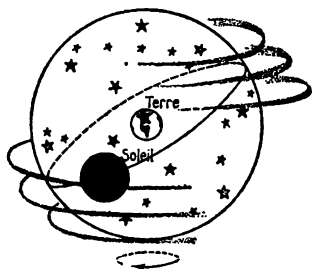


Figure 1. — Le système de Ptolémée. La sphère céleste tourne une fois par jour autour de la Terre, entraînant avec elle le Soleil, qui tourne une fois par an autour de la Terre.

Aristote.

Aristote naquit en 384 avant J.-C. Il fut le maître d'Alexandre le Grand, qui conquiert la plus grande partie du monde alors connu et répandit la

civilisation grecque partout où il allait. En conséquence, la réputation d'Aristote, qui était célèbre en Grèce comme philosophe, s'étendit au monde entier. Ses idées acquirent une importance qu'elles n'auraient pas eue dans d'autres circonstances. Ses ouvrages, traduits en arabe par des érudits juifs, furent ensuite introduits par les musulmans en Europe, où ils furent retraduits en latin. Les idées d'Aristote, absorbées et transformées par Saint Thomas d'Aquin, devinrent partie intégrante de la théologie chrétienne. Sous cette forme, la philosophie d'Aristote traversa les siècles en freinant la liberté de pensée de Copernic, de Giordano Bruno, de Galilée et de bien d'autres.

Les idées d'Aristote étaient nombreuses et nous ne citerons que celles qui gênèrent l'évolution de la théorie de la gravitation. Aristote imaginait l'univers comme une série de sphères emboîtées les unes dans les autres. En dehors de la sphère extérieure, c'était le néant ; la sphère intérieure, la Terre, était immobile. Les autres sphères se déplaçaient, emportant avec elles le Soleil, les planètes et la Lune. Les étoiles étaient fixées dans la sphère extérieure ; la sphère de la Lune était une séparation importante entre la région de la Terre, où les choses pouvaient changer, et les régions plus éloignées, où tout était immuable et parfait. Aristote préférait le cercle à la ligne droite car la

ligne droite doit s'arrêter quand elle rencontre une limite, tandis que le mouvement circulaire ne s'arrête jamais, mais continue indéfiniment sur lui-même. Pour cette raison, disait Aristote, les mouvements en dehors de la sphère de la Lune devaient être circulaires. Une autre affirmation dont la vérité semblait évidente à Aristote était que, sur la Terre, les corps tombent d'autant plus vite qu'ils sont plus lourds. C'étaient là quelques-unes des idées fausses que les philosophes ont dû surmonter des siècles plus tard.

Le système de Ptolémée.

Il ne faut pas s'imaginer que le tableau tracé par Aristote ait été admis universellement. Déjà un de ses contemporains, un autre Grec nommé Héraclite, avait suggéré que les étranges mouvements des planètes Mercure et Vénus, qui restent toujours au voisinage du Soleil et qu'on voit tantôt d'un côté de celui-ci, tantôt de l'autre, pouvaient s'expliquer si ces deux planètes tournaient autour du Soleil et non autour de la Terre. Héraclite n'allait pas plus loin ; dans son système, le Soleil, Mercure et Vénus tournaient autour de la Terre. Au siècle suivant, un autre astronome grec, Aristarque de Samos, alla plus loin et proposa d'admet-

tre que, peut-être, les autres planètes connues — Mars, Jupiter et Saturne, — tournaient, elles aussi, autour du Soleil. Il eut aussi l'audace de souligner que le mouvement annuel des étoiles pouvait s'expliquer aussi bien si la *Terre* tournait autour du Soleil qu'en admettant l'hypothèse inverse. Il expliquait aussi le lever et le coucher du Soleil en suggérant que la *Terre* tournait sur son axe en un jour et une nuit. Malheureusement, ce copernicien avant la lettre ne prit pas la peine de montrer en détail que sa théorie concordait avec les mouvements réels des corps célestes et, comme elle ne s'appuyait sur rien de solide, elle fut vite oubliée. De plus, au siècle suivant, Hipparque de Rhodes fournit à la théorie géocentrique un appui important en s'en servant pour calculer des tables des positions futures des planètes. Le célèbre Ptolémée d'Alexandrie continua son travail et le fit figurer dans son encyclopédie de l'astronomie, appelée l'*Almageste*, rédigée en 150 après J.-C. et traduite en latin au Moyen Age ; la science du passé aidait ainsi au réveil de l'Europe. La théorie géocentrique admise par Ptolémée fut lancée à travers les siècles par l'*Almageste* et porta, pour cette raison, le nom de système de Ptolémée. Appuyée par la réputation d'Aristote, elle fut acceptée comme vraie par l'Europe de la Renaissance.

Difficultés que présentait le système de Ptolémée.

Vous pourriez vous demander de quelle nature étaient les calculs que des astronomes comme Hipparque et Ptolémée pouvaient faire à l'appui d'une théorie affirmant que la *Terre* est le centre de l'univers. Il faut, pour justifier ce système, pas mal de tripotages, mais ce n'est pas impossible. Avant d'étudier comment cela a été fait, examinons les informations dont ces astronomes disposaient.

Les cinq planètes visibles sont Mercure, Vénus, Mars, Jupiter et Saturne. Nous pouvons, sans télescope, observer leurs trajets dans le ciel ainsi que ceux du Soleil, de la Lune et d'un nombre remarquable d'étoiles. Si nous pouvions être en dehors du système solaire pour regarder cet ensemble fonctionner tout comme un jouet mécanique, tout nous serait évident, mais, malheureusement, nous sommes obligés de tout observer de la Terre et il n'est nullement évident dans ce cas que les planètes tournent autour du Soleil ; c'est ce qui a donné tant de travail aux anciens astronomes. Lorsqu'on observe une planète pendant un certain temps, on constate qu'elle suit une trajectoire très particulière. Quelle est celle de Mars par exemple ?

Un cercle, une ellipse ou même une spirale ? Non. Commençons à observer Mars à un moment où il se déplace dans la même direction que la Terre et est un peu en avance sur elle. Nous déterminons la position de Mars par rapport aux étoiles éloignées. On voit sur la figure 2 que la position apparente de Mars par rapport à ses repères varie avec le temps. Au début, il semble avancer par rapport aux étoiles, puis il paraît s'être arrêté ! A l'observation suivante, nous voyons que Mars a bel et bien reculé, toujours par rapport aux étoiles. Il semble presque que la planète hésite ; vous comprenez maintenant pourquoi le mot « planète » signifie « vagabonde ». La figure 3 vous montre les trajectoires des planètes vues de la Terre.

Ces mouvements, tantôt directs et tantôt rétrogrades n'incitent guère à penser, comme Aristote, que les planètes tournent en cercles simples, ou à vitesse constante. Ce n'est pas seulement Mars qui se comporte de cette façon étrange ; les autres planètes ne sont pas plus dociles et on ne les voit pas tourner en orbites circulaires autour de la Terre. Seul le Soleil semble le faire. Voyons maintenant comment des philosophes tels que Hipparque et Ptolémée pouvaient expliquer ce que chacun pouvait voir dans le ciel et soutenir cependant que les planètes décrivaient, à une

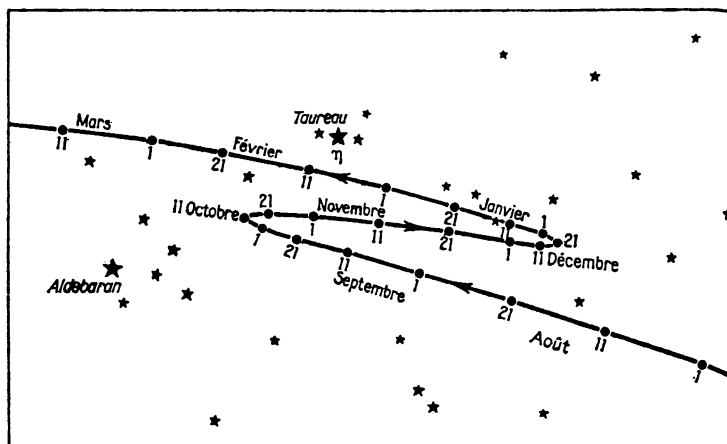


Figure 2. — Trajectoire de la planète Mars par rapport aux étoiles, du mois d'août au mois de mars d'une certaine année. Remarquez le mouvement rétrograde du 11 octobre au 21 décembre.

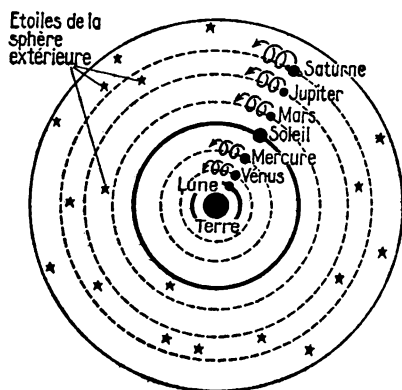


Figure 3. — Les trajectoires des planètes connues au temps de Ptolémée, telles qu'elles apparaissent vues de la Terre. Les planètes décrivent des boucles, le Soleil et la Lune de simples cercles.

vitesse constante, des cercles dont le centre était la Terre.

Comment rendre admissible le système de Ptolémée.

Pour rendre acceptable le système de Ptolémée, on introduisait deux séries de cercles hypothétiques, les *épicycles* et les *déférents*. La planète décrivait le petit cercle, l'épicycle, dans la direction indiquée par la figure 4 ; pendant ce temps, l'épicycle lui-même tournait de façon que son centre décrive le grand cercle, le déférent, dont le centre était la Terre. En combinant ces deux mouvements et en faisant varier les dimensions relatives des deux cercles et les vitesses relatives de rotation, on pouvait obtenir toutes sortes de trajectoires sur mesure, par exemple une trajectoire comme celle de la figure 3. Quand Mars décrivait l'épicycle imaginaire, il paraissait, vu de la Terre, se déplacer tantôt vers la droite, tantôt vers la gauche, ce qui concordait avec les observations.

Chaque planète avait son propre épicycle et son propre déférent. Le diamètre de l'un et de l'autre, la vitesse de rotation du centre de l'épicycle sur le déférent et celle de la planète sur son épicycle variaient d'une planète à l'autre. Ce procédé

LA GRAVITATION

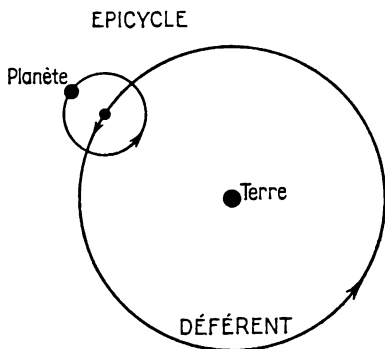


Figure 4. — Les planètes décrivent l'épicycle dans la direction indiquée, tandis que le centre de l'épicycle décrit le déférent.

permettait d'arriver à une très bonne approximation des mouvements observés, tout en conservant la fiction d'après laquelle les planètes tournaient en cercle à une vitesse constante autour de la Terre. Toutefois, malgré sa complication, ce système ne concordait pas *complètement* avec les observations des astronomes. Au cours des âges, on le recommanda en entassant épicycles sur épicycles pour tenir compte des nouvelles données. On arriva ainsi à un ensemble compliqué qui était fonctionnel, mais qui n'avait aucune beauté. La notion de beauté fondée sur la simplicité d'une théorie est très importante pour le savant. Cette attitude intuitive, se rapprochant de celle de l'artiste, peut quelquefois induire les scientifiques en erreur, mais elle n'en joue pas moins un grand rôle dans leur pensée.

Vous vous êtes maintenant rendu compte que la théorie d'après laquelle les planètes tourneraient autour de la Terre n'est, après tout, pas si fantastique que cela ! D'ailleurs, les planètes extérieures, c'est-à-dire celles dont les orbites sont extérieures à l'orbite terrestre, tournent en fait autour de la Terre (d'une certaine façon) en tournant autour du Soleil ; mais les moyens artificiels introduits pour faire de la Terre, et non du Soleil, le centre de notre système empêchent qu'il existe, dans tout ce fouillis, aucune loi fondamentale du mouvement. Il fallait un système nouveau, plus simple ; il apparut au début du XVI^e siècle, grâce à Copernic.

Copernic.

Copernic naquit en 1473 dans ce qui est maintenant la Pologne. Il avait latinisé en Copernicus son nom véritable, qui était peut-être d'origine allemande. A la mort de son père, il fut adopté par son oncle maternel, un riche évêque, qui l'envoya à l'université de Cracovie, où il y avait alors une célèbre école d'astronomie dont le rôle principal était de tenir le calendrier ecclésiastique. Les astronomes se trouvaient alors en face d'un problème formidable : adapter le calendrier existant de façon à mieux prédire des choses aussi

fondamentales que les dates des pleines lunes et de l'équinoxe de printemps, dont dépendait notamment la fête de Pâques. Le travail des astronomes cracoviens intéressa Copernic. Encore au collège, il était arrivé à la conclusion que le coucher et le lever du Soleil étaient dus, non au mouvement de ce dernier, mais à celui de la Terre. Comme on croyait communément à l'immobilité de la Terre, il fallait de l'audace pour avancer qu'elle puisse tourner sur son axe. C'est peut-être déjà à ce moment que Copernic comprit que les mouvements des planètes paraîtraient beaucoup plus simples si on considérait le *Soleil*, et non plus la Terre, comme le centre de rotation. A partir du moment où Copernic avait accepté la possibilité du mouvement de la Terre, il n'était pas très difficile pour lui d'imaginer qu'elle pouvait tourner autour du Soleil. A ce moment, il ne pouvait fonder ses idées sur aucun calcul, sur aucune preuve. Une vie de travail fut nécessaire pour passer d'une brillante théorie de jeune génie aux affirmations fondées sur des raisonnements serrés qui constituent son livre *De Revolutionibus*.

La genèse d'une nouvelle théorie.

L'évêque envoya ensuite son neveu étudier en Italie, le pays où la Renaissance avait commencé

et qui attirait les plus grands savants de l'époque. L'esprit de libre examen régnait à l'université de Bologne. Copernic s'intéressa notamment aux tentatives faites pour décrire l'univers en termes de géométrie avec l'espoir de simplifier le vieux système de Ptolémée. Les astronomes de Bologne confirmèrent Copernic dans l'idée que la théorie la plus simple est la meilleure. Il passa dix ans en Italie, étudia le droit — et obtint un diplôme dans cette discipline —, la médecine et le grec, se livrant à ses fantaisies astronomiques et à d'autres, plus frivoles.

Pendant l'absence de Copernic, son oncle lui avait obtenu un canonicat à la cathédrale de Frauenburg, près de la frontière russo-polonaise actuelle. Le jeune chanoine obtint un délai, d'abord pour continuer ses études en Italie et ensuite pour être le médecin particulier de son oncle. En 1512, quand il assuma enfin les devoirs de sa charge à Frauenburg (quinze ans après sa nomination), Copernic avait eu largement le temps de développer et d'organiser ses idées sur l'astronomie et c'est à cette date qu'il les énonça dans une brochure qu'il fit circuler parmi ses amis.

A Frauenburg, Copernic s'installa un observatoire dans l'une des tours des murailles entourant la cathédrale, qui était fortifiée. Dans cette romanesque aire d'aigle, Copernic fit de nombreuses

observations du ciel qui, malheureusement, n'étaient pas tout à fait assez exactes, puis il chercha à faire entrer ces mesures, ainsi que celles, également incorrectes, faites par d'autres astronomes, dans le cadre de son nouveau système planétaire ; il détermina les orbites des planètes et les rayons des « cercles » qu'elles décrivaient autour du Soleil. Ce travail, qui aurait, de toute façon, été fort difficile, l'était plus encore parce que Copernic croyait à l'exactitude de ses données. Une autre difficulté était que Copernic ne s'était jamais rendu compte que les orbites planétaires ne sont pas circulaires, mais elliptiques, ce qui influence leur calcul. Il est extraordinaire que, malgré ces handicaps, Copernic ait gardé sa foi en la simplicité de la théorie héliocentrique. Il n'est guère étonnant que, dans ces conditions, Copernic n'ait pu faire concorder exactement les détails de son système avec les observations, de sorte qu'en fin de compte il fut forcé de recourir à ces mêmes épicycles qui défiguraient le système de Ptolémée.

De Revolutionibus.

Il ne faudrait pas croire que les observations astronomiques de Copernic étaient très inexactes ; en fait, elles n'atteignaient pas le degré d'exacti-

tude nécessaire pour déterminer avec précision les orbites des planètes. Par exemple, il avait calculé pour la distance de la Lune une valeur égale à 60,30 fois le rayon terrestre, alors que nous admettons aujourd'hui 60,37. Pour les rayons des orbites de Mars et de Jupiter, il prenait respectivement 1,520 et 5,219 fois le rayon de l'orbite de la Terre ; les chiffres admis aujourd'hui sont respectivement 1,524 et 5,203. Pour l'*année sidérale* (le temps que met le Soleil pour effectuer sa révolution apparente parmi les étoiles et revenir à son point de départ), la valeur de Copernic n'était supérieure que de 30 secondes à la nôtre. Les travaux de Copernic lui permirent en outre de suggérer des modifications au calendrier ecclésiastique ; ses recommandations furent adoptées quarante ans après sa mort par le pape Grégoire XIII qui établit le calendrier grégorien en usage encore aujourd'hui.

La Réforme avait rendu l'Eglise catholique méfiante à l'égard des idées nouvelles et, d'autre part, l'Eglise luthérienne qui venait de se créer tendait à interpréter la Bible littéralement. A cause de ces délicatesses religieuses, Copernic n'avait guère cherché à propager ses théories qui, quelques années plus tôt, auraient été considérées comme n'ayant aucun rapport avec la religion. La brochure de 1512 avait cependant attiré beaucoup

de disciples qui voulaient mieux connaître cette nouvelle façon de considérer l'univers. En 1540, Copernic permit à un étudiant de publier un résumé de ses idées sous le titre de *Premier compte rendu*. Enfin, il décida de permettre la publication de tout le manuscrit, qui représentait le travail de trente années. Copernic ne donna pas de titre à ce chef-d'œuvre qui est connu sous celui de *De Revolutionibus orbium caelestium libri VI* (Les Révolutions de sphères célestes). Copernic reçut l'ouvrage achevé quelques semaines avant de mourir le 24 mai 1543.

Malgré ses défauts, *De Revolutionibus* offrait à ses lecteurs une conception d'une belle simplicité. Il est triste de devoir avouer que cette simplicité était le seul avantage du système de Copernic sur celui de Ptolémée. Un choix rationnel entre deux théories des mouvements planétaires, l'une et l'autre fondées sur des observations insuffisantes et inexactes, était impossible. Le monde avait besoin d'un homme qui consacrerait sa vie à des mesures extrêmement précises du vagabondage des planètes. Heureusement, cet homme existait : c'était Tycho Brahé, né trois ans après la mort de Copernic.

CHAPITRE DEUX

L'ELLIPSE

Vous vous demandez probablement en quoi le chapitre précédent se rapporte à la gravitation. La réponse est que le système de Copernic est indispensable pour ouvrir la voie à une théorie de la gravitation. Newton, malgré son génie, n'aurait probablement pu formuler la loi de la gravitation universelle s'il avait été limité au système de Ptolémée. La gravité newtonienne était une force dépendant (d'une façon dont nous parlerons plus tard) de l'éloignement d'un *centre de force*. La simplicité de la théorie de Copernic, où le mouvement est symétrique par rapport à un centre, était nécessaire pour que la loi de la gravitation puisse apparaître.

Deux hommes, Tycho Brahé et Johannes Kepler, ont relié Copernic à Newton. Le premier, en fournissant une série de données réellement exactes et complètes, permit au second, qui fut son élève, de découvrir que les orbites des planètes sont elliptiques et non circulaires. Newton put tirer des lois de Kepler sa loi de la gravitation.

Tycho Brahé.

Tycho Brahé, né en 1546, appartenait à une famille noble danoise. Au cours de ses études dans diverses universités de l'Europe du Nord, il avait acquis un grand intérêt pour l'astronomie. Il avait été très impressionné par l'inexactitude des tables alors existantes du mouvement des planètes et s'était rendu compte qu'il serait très difficile d'établir une théorie convenable à partir de mauvaises données. En 1572, une étoile nouvelle, une *nova*, apparut soudain dans le ciel, si brillante qu'elle était visible en plein jour. Ces phénomènes ne sont pas mystérieux pour les astronomes d'aujourd'hui, mais la nova de 1572 provoqua une sensation parce qu'elle conduisait à douter de l'affirmation d'Aristote, d'après laquelle rien de nouveau ne pouvait apparaître parmi les étoiles. Si, d'autre part, cette nova était assez proche de nous, la

théorie n'était pas ébranlée. La détermination de la distance de la nova était donc très importante et un mémoire de Tycho Brahé sur ce sujet attira l'attention du roi Frédéric qui régnait alors sur le Danemark. Le roi, qui protégeait les arts et les sciences, ne fut pas long à accorder à Tycho Brahé son aide sous la forme de toute l'île de Hven (un peu au nord de Copenhague, sur le bras de mer, appelé le Sund, séparant le Danemark de la Suède) et les fonds nécessaires pour y créer un observatoire. Grâce à ce superbe ancêtre de la subvention gouvernementale, Tycho Brahé se constitua un petit royaume avec deux observatoires — dont l'un souterrain pour que les instruments délicats ne soient pas affectés par les vibrations — une papeterie, une imprimerie, des laboratoires, un musée, une bibliothèque et même une prison, bref, tout ce qu'un « savant universel » peut désirer ! Cet observatoire attira des savants de toute l'Europe.

Tycho Brahé consacra les vingt années qui suivirent à des observations exactes des étoiles et des planètes. Il étudia longuement, entre autres, les mouvements de la planète Mars et il établit un grand catalogue d'étoiles indiquant les positions de beaucoup d'entre elles. Bien que la lunette astronomique n'ait pas encore été inventée, Tycho Brahé put faire des déterminations remarquablement précises des positions stellaires et planétaires,

LA GRAVITATION

en partie parce qu'il était vraisemblablement un homme extraordinairement soigneux et doué d'une excellente vue, mais aussi grâce au sextant, inventé par lui. Cet instrument, une variante du quadrant de Copernic, est très simple. Il consiste essentiellement en deux alidades, l'une fixe, l'autre se déplaçant sur un limbe gradué (voir figure 5). L'observateur, regardant par des viseurs fixés à l'alidade mobile, déplace celle-ci jusqu'à ce qu'il voie l'étoile ou la planète à travers les deux viseurs ; il lit ensuite sur le limbe gradué l'angle des deux alidades. L'angle maximal possible avec l'instrument de Tycho Brahé était de 60° , d'où son nom de sextant. C'était un appareil fort simple, mais une version à peine perfectionnée est encore d'usage courant en navigation.

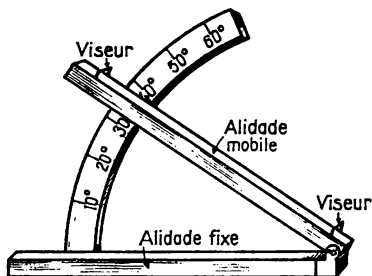


Figure 5. — Le sextant de Tycho Brahé.

Il n'est guère étonnant que, pendant toutes ces années consacrées à accumuler tant de mesures,

Tycho Brahé se soit interrogé sur leur sens. D'une part, il admirait la simplicité de la théorie de Copernic ; d'autre part, il ne pouvait croire que la Terre puisse se déplacer. Il arriva à un compromis par lequel les planètes tournent autour du Soleil, celui-ci et la Lune tournant autour de la Terre.

Quelques années après que le grand roi Christian IV eut succédé à son père, l'idylle scientifique sur l'île de Hven prit fin. Tycho Brahé, homme d'un caractère fantasque, était incapable de s'entendre avec le nouveau roi qui reprit possession de l'observatoire et lui interdit de travailler à Copenhague. Tycho Brahé s'exila volontairement à Prague où, avant de pouvoir recommencer à travailler, il mourut en 1601. Le seul résultat de son séjour à Prague fut la formation d'un jeune assistant, Johannes Kepler. La malchance qui fit mourir en exil le pauvre Tycho Brahé fut une bonne fortune pour le monde, car elle eut pour effet de mettre ses archives dans les mains de l'homme qui leur donnerait une signification énorme, Johannes Kepler.

Johannes Kepler.

Contrairement à Copernic et à Tycho Brahé, Kepler, né en Allemagne en 1571, appartenait à

une famille pauvre, pas même honorable. Son père était un alcoolique et sa mère avait été poursuivie pour sorcellerie. Il obtint cependant une bourse à l'université de Tubingen, où il fut très influencé par les idées d'un professeur de mathématiques, disciple de Copernic. A sa sortie de l'université, Kepler devint professeur à Gratz, où il consacra ses nombreux loisirs à réfléchir sur les problèmes astronomiques. Un livre exposant certaines de ses idées (inexactes d'ailleurs), attira l'attention de Tycho Brahé qui, à son arrivée à Prague en 1599, demanda à Kepler d'être son assistant, ce que Kepler accepta avec joie.

Quelques années plus tard, Kepler hérita des observations de Brahé, mais non de ses instruments. Il n'était pas assez riche pour acheter ou faire fabriquer un matériel de la même qualité et les circonstances l'obligèrent à faire ce à quoi il était particulièrement apte : trouver un système de base concordant avec cette grande masse de mesures correctes. La première chose à faire était de trouver, pour l'orbite de Mars, une formule simple concordant avec les observations de Brahé. Kepler commença à suivre la voie traditionnelle et à chercher une combinaison de *cercles* donnant une orbite théorique passant par les points où la planète avait été effectivement observée. Après quatre ans de calculs fastidieux, Kepler parvint à

établir une orbite théorique qui ne s'écartait jamais des positions observées de plus du quart d'une pleine lune (plus exactement d'un quart de l'angle sous-tendu par la pleine lune). On aurait pardonné à Kepler de s'être arrêté là, avec un soupir de satisfaction. Ce ne fut pas le cas.

Nous arrivons maintenant à un tournant de l'histoire de la science, qui, d'une certaine façon, est aussi important que les lois de Kepler elles-mêmes. Kepler était si sûr de l'exactitude des chiffres de Brahé, qu'il rejeta une théorie qui ne s'adaptait pas *exactement* aux observations. Il était impossible de trouver des orbites circulaires concordant avec les faits. Kepler continua de travailler et, après avoir essayé et rejeté 70 hypothèses (!) il trouva enfin une courbe satisfaisante. Il eut la surprise de constater que c'était une *ellipse* dont le Soleil occupait un des foyers. Au lieu de retoucher les données pour les adapter à la théorie, Kepler retouchait la théorie pour qu'elle s'adapte aux données. C'était l'aurore de la science moderne !

L'ellipse.

On n'appelle pas ellipse toute courbe ayant plus ou moins la forme d'un œuf. On peut définir l'ellipse de plusieurs façons par des formules

mathématiques qui précisent sa forme. Chaque point d'une ellipse est *là où* il est conformément à la formule qui correspond à cette ellipse particulière. Pour tracer une ellipse, choisissez deux points sur une feuille de papier, comme dans la figure 6, et appelez-les F et F' . Enfoncez une punaise en chaque point et passez ensuite sur les punaises une boucle de fil (dont la longueur totale soit supérieure au double de la distance séparant les deux points). Placez la pointe d'un crayon contre le fil et, maintenant ce dernier tendu, déplacez le crayon partout où la ficelle vous le permet : la courbe que vous tracerez sera une ellipse. Vous constaterez que le crayon, retenu par la longueur du fil et la position des punaises, ne peut tracer *autre chose* qu'une ellipse dont la forme et les dimensions dépendront de la longueur du fil et de la distance des punaises. La longueur du *grand axe* (le plus long des deux axes de symétrie de l'ellipse) est habituellement représentée par $2a$. Les points F et F' sont les foyers de l'ellipse. En modifiant le longueur du fil ou la distance entre les punaises, on peut tracer des ellipses de forme et de dimensions différentes. Par exemple, si la longueur totale du fil n'est que le double de la distance entre les punaises, le crayon ne peut tracer qu'une ligne droite. Si les deux points F et F' sont confondus, l'ellipse devient un cercle et le segment

L'ELLIPSE

de droite sont les deux formes extrêmes d'une ellipse ; il existe toute une série d'intermédiaires, comme le montre la figure 7.

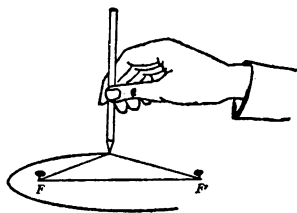


Figure 6. — Comment tracer une ellipse.

Les deux premières lois de Kepler.

Kepler se demanda naturellement si les planètes autres que Mars avaient, elles aussi, des orbites elliptiques. Il constata qu'il en était bien ainsi. L'énoncé de cette conclusion est connu sous le nom de

PREMIÈRE LOI DE KEPLER : *Les orbites des planètes sont des ellipses, dont le Soleil est l'un des foyers.*

Il constata aussi que les planètes n'ont pas la même vitesse en tous les points de leur orbite ; elles vont plus vite quand elles sont plus proches du Soleil, ce qui suggère que quelque chose, lié au Soleil, est la *cause* du mouvement. Le rapport entre la vitesse de la planète et sa position sur l'orbite est exprimé indirectement par la

LA GRAVITATION

DEUXIÈME LOI DE KEPLER : *Les aires balayées par le rayon vecteur joignant le Soleil à la planète sont proportionnelles au temps.*

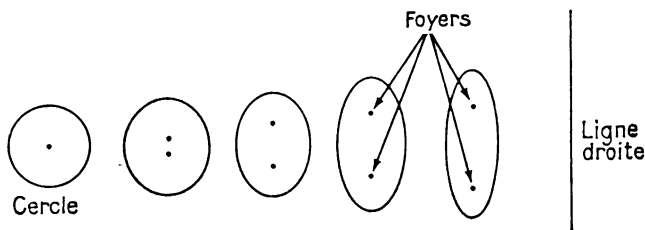


Figure 7. — Ellipses de diverses formes. Les orbites des planètes sont presque exactement circulaires.

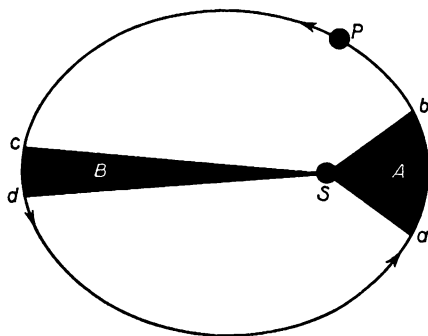


Figure 8. — Le mouvement de la planète P autour du Soleil S . Quand la planète va de a en b pendant un certain intervalle de temps, le segment de droite qui la joint au Soleil balaie l'aire A ; pendant qu'elle va de c en d pendant un intervalle de temps de même durée, le segment balaie l'aire B . D'après la deuxième loi de Kepler, l'aire A est égale à l'aire B .

La figure 8 devrait vous faire mieux comprendre la signification de cette loi. Imaginez que le plan de l'orbite d'une planète soit une feuille de papier et que vous puissiez relier le Soleil S à la planète P par un fil élastique fortement encré. Quand la planète se déplace sur l'ellipse, le fil se déplace aussi, laissant derrière lui une zone encrée. La loi de Kepler prédit que, si vous choisissez des intervalles de temps égaux quelconques, l'aire de la surface encrée pendant le premier intervalle est égale à celle de la surface encrée pendant l'intervalle suivant (bien que sa forme soit différente) qui, elle-même, est égale à l'aire encrée pendant le troisième intervalle et ainsi de suite jusqu'à ce que toute l'ellipse ait été balayée. Cette loi vous montre, avec l'aide de la figure, que la planète doit se déplacer plus vite quand elle est près du Soleil que quand elle en est loin. Pendant le mois où la planète est proche du Soleil, elle balaie la surface A sur le diagramme et, pendant le mois où elle en est le plus éloignée, la surface B . Les segments Sa et Sb sont beaucoup plus courts que Sc et Sd ; donc, puisque les aires sont égales, l'arc ab doit être plus long que l'arc cd . Comme la planète met le même temps pour aller de a en b que pour couvrir la distance plus courte entre c et d , elle doit se déplacer plus vite sur ab que sur cd . La deuxième loi de Kepler porta le coup de grâce à

une autre idée très ancienne, celle de la constance de la vitesse des planètes. En 1609, Kepler publia ses deux premières lois dans un livre appelé *Astronomie nouvelle*.

Troisième loi de Kepler.

Kepler se trouvait encore en face d'une importante question non résolue : peut-on exprimer une relation entre la période d'une planète (le temps qu'elle met à tourner autour du Soleil, autrement dit son année) et les dimensions de son orbite ? Kepler réfléchit à ce problème pendant dix ans, dans l'intervalle de ses autres travaux. Enfin, il arriva à la solution, qu'il publia dans son ouvrage *L'Harmonie du monde*, en 1619. C'est la

TROISIÈME LOI DE KEPLER : *Les cubes des grands axes des orbites sont en rapport constant avec les carrés des temps des révolutions.*

Un exemple facilitera la compréhension de cette loi. Prenons le cas de la Terre et de Mars et faisons une comparaison. L'année de Mars dure 686,98 jours, celle de la Terre 365,24 jours. Le rapport de ces deux nombres est 1,880, dont le carré est 3,530. La distance moyenne au Soleil est, pour Mars, de 228,6 millions de km, pour la Terre, de 150 millions de km. Le rapport de ces distances

L'ELLIPSE

est égal à 1,524, dont le cube est 3,538, très voisin de 3,530, carré du premier rapport. L'accord n'est pas parfait parce que la loi de Kepler n'est pas tout à fait exacte sous la forme énoncée par son auteur : il ne savait pas qu'il faut tenir compte dans le calcul de la masse du Soleil et de celle des planètes. Quand on introduit cette correction, les écarts entre la loi de Kepler et les observations, déjà très faibles, disparaissent complètement.

La loi de Kepler montre que, plus une planète est éloignée du Soleil, plus sa période sera longue, comme l'indique le tableau suivant :

PÉRIODES PLANÉTAIRES ET DISTANCES MOYENNES AU SOLEIL

	<i>Période</i>	<i>Distance moyenne au Soleil</i>
Mercure	87,97 jours	58 millions de km
Vénus	224,70 jours	108 » »
Terre	365,24 jours	150 » »
Mars	686,98 jours	228 » »
Jupiter	11,86 années	777 » »
Saturne	29,46 années	1 430 » »
Uranus	84,01 années	2 880 » »
Neptune	164,79 années	4 500 » »
Pluton	248,43 années	5 900 » »

La troisième loi sous forme mathématique.

Si nous comparons deux planètes quelconques, que nous appellerons A et B , dont les périodes sont T_A et T_B et dont les distances moyennes au Soleil sont r_A et r_B , la troisième loi de Kepler peut s'écrire sous la forme mathématique suivante :

$$\frac{T_A^2}{T_B^2} = \frac{r_B^3}{r_A^3}$$

En écrivant que le produit des extrêmes est égal au produit des moyens (c'est-à-dire en multipliant en croix) et en divisant d'abord par r_A^3 puis par r_B^3 , nous obtenons :

$$\frac{T_A^2}{r_A^3} = \frac{T_B^2}{r_B^3}$$

En comparant chaque planète à chacune des autres, on arrive à toute une série d'équations analogues, chaque fraction étant égale à toutes les autres :

$$\frac{T_A^2}{r_A^3} = \frac{T_B^2}{r_B^3} = \frac{T_C^2}{r_C^3} = \text{et ainsi de suite.}$$

Cela signifie que le carré de la période de *n'importe quelle* planète divisé par le cube de sa distance moyenne au Soleil donnera toujours le même

nombre, quelle que soit la planète choisie. Ce nombre est donc ce que nous appelons une *constante*, c'est-à-dire qu'il ne varie pas d'une planète à une autre. Il est facile de le calculer et nous le représentons par le symbole K . Nous pouvons donc écrire ainsi l'équation valable pour toutes les planètes :

$$\frac{T^2}{r^3} = K$$

Une fois les trois lois de Kepler énoncées, il était possible que quelqu'un découvre la loi de la gravitation, celle de l'inverse du carré des distances. En fait, près de cinquante ans s'écoulèrent avant que Newton arrive à ce résultat, mais, dès 1619, la voie était ouverte. Kepler lui-même était sur le bon chemin avec son idée des rayons de force émanés du Soleil. Il pensait que, à mesure que le Soleil tournait, ses rayons poussaient d'une façon ou d'une autre les planètes. Plus la planète est éloignée du Soleil, moins les rayons sont forts, ce qui, d'après Kepler, expliquait pourquoi les planètes éloignées se déplacent plus lentement que les planètes voisines. Cette idée charmante peut nous paraître risible, mais elle montre que Kepler avait l'intuition que nous devons nous tourner vers le Soleil pour rechercher la source

du mouvement et que l'effet diminue de quelque façon avec la distance.

Entre les lois de Kepler gouvernant le mouvement des planètes et la loi de la gravitation universelle de Newton s'appliquant à tous les corps, se placent les travaux de Galilée, où, pour la première fois, nous rencontrons l'idée de gravitation en tant que force. Les idées de Galilée sur la mécanique (l'étude du mouvement des corps) inspirèrent souvent Newton dans sa découverte de lois du mouvement énoncées avec plus de précision.

CHAPITRE TROIS

LA CHUTE DES CORPS

Galilée était ce qu'on appelle aujourd'hui un contestataire. Il avait mis en doute la plus grande partie de ce que ses professeurs de l'université de Pise lui avaient enseigné. Devenu ensuite professeur, il discutait avec ses collègues. Ce n'était absolument pas le genre d'homme à croire ce qu'Aristote avait enseigné plus de dix-neuf siècles auparavant pour l'unique raison que tout le monde considérait ces affirmations comme évidentes.

Galilée, né en 1584 à Pise, en Toscane, commença très jeune à faire progresser la science. Un an après avoir quitté l'université de sa ville natale, il avait inventé une balance hydrostatique et deux ans plus tard, il publia un travail sur la détermination du centre de gravité des solides,

chose qui était alors extrêmement difficile puisqu'on ne disposait pas encore du calcul infinitésimal.

A la suite de ses travaux, Galilée fut nommé titulaire de la chaire de mathématiques à l'université de Pise, ce qui était un grand honneur pour un jeune homme de vingt-cinq ans. Son attitude arrogante et dépourvue de tact à l'égard de ceux qui ne partageaient pas ses idées le rendit très impopulaire, de sorte que deux ans plus tard, il perdit son poste. Il devint immédiatement professeur à l'université de Padoue où il enseigna pendant près de vingt ans. Ses cours avaient tant de succès qu'il finit par les donner dans une salle pouvant contenir 2 000 personnes. Pendant son séjour à Padoue, Galilée aida à mettre au point le thermomètre, la lunette astronomique et le microscope ; il fit progresser l'hydrostatique et l'acoustique. La réputation que lui avait valu ses travaux et ses cours gênait son travail sur ce qui le passionnait réellement, la découverte des lois du mouvement des corps. Il pensait que les lois régissant le mouvement des corps sur la Terre s'appliqueraient également aux étoiles et aux planètes. Galilée était naturellement partisan de la théorie de Copernic. Lorsqu'il apprit que Hans Lippershey, apprenti d'un opticien hollandais, avait découvert qu'il était possible, en groupant deux

lentilles, de faire paraître plus proches des objets éloignés, Galilée comprit immédiatement les possibilités de cet instrument. Il le dirigerait vers le ciel. La lunette fournit à Galilée les moyens dont il avait besoin pour s'attaquer à l'idée que les cieux étaient parfaits, immuables, tout à fait différents de la Terre et tournaient autour de celle-ci.

Galilée ne fut pas désappointé par ce qu'il vit. Une Lune à surface ridée, un Soleil marqué de taches qui apparaissaient et disparaissaient, une planète Vénus ayant des phases comme celles de la Lune, c'étaient là des choses absolument impossibles d'après Aristote et qui rendaient la théorie de Copernic encore plus plausible. En 1609, Galilée publia ses découvertes dans un petit livre, *Le Message des étoiles* qui, inutile de le dire, provoqua une sensation énorme et mit en colère beaucoup de gens, aussi bien catholiques que protestants. Malheureusement, Galilée quitta la même année la protection de Padoue qui, faisant partie de la République de Venise, résistait aux forces de l'Inquisition.

Persécuté par l'Inquisition.

Grâce à sa réputation et à son amitié avec le duc de Toscane, Galilée se vit offrir un poste de

mathématicien à la cour de ce dernier, à Florence. Il pouvait donc rentrer dans sa province natale — Pise et Florence sont distantes de moins de quatre-vingts kilomètres. Il toucherait un traitement plus élevé et, chose particulièrement importante, il aurait plus de loisirs. Galilée accepta ce poste et s'exposa ainsi à ses ennemis qui gagnèrent peu à peu du terrain à Rome et en 1616 parvinrent à l'obliger à comparaître devant le tribunal de l'Inquisition qui lui ordonna de « s'abstenir complètement d'enseigner ou de défendre cette opinion ou doctrine et même de la discuter ». Galilée céda, mais n'oublia pas les idées qui lui étaient si chères. En 1623, quand son vieil ami le cardinal Barberini fut élu pape, Galilée commença à écrire les *Dialogues sur les grands systèmes du monde* qu'il acheva six ans plus tard. Il proclamait une fois de plus que la Terre n'est pas le centre de l'univers. Grâce à la vigueur de son style, ce livre eut énormément de lecteurs qui pouvaient être amenés à partager l'opinion de Galilée par les arguments convaincants qu'il exposait. L'Eglise devait agir. A nouveau Galilée fut amené à comparaître devant le tribunal de l'Inquisition. Il céda. Il fut placé en résidence surveillée à vie et ses *Dialogues* furent interdits. Galilée avait nié la vérité, mais son esprit n'était pas brisé. Il écrivit le plus grand de ses livres, *Deux nouvelles sciences*,

sous le double handicap de la nécessité de garder le secret et d'une vue qui baissait de plus en plus. Ses amis parvinrent à faire passer le manuscrit en Hollande, où il fut publié en 1638. Quatre ans plus tard, Galilée mourut, complètement aveugle. Newton devait naître un peu plus tard, au cours de la même année 1642.

La chute des corps.

On trouve les découvertes de Galilée sur la gravitation dans *Deux nouvelles sciences*. Ce livre décrit une conversation entre trois hommes dont l'un, Salviati, représente le point de vue de Galilée ; c'est lui qui énonce les doutes de Galilée qui ont conduit à mieux comprendre la gravitation. Les voici, tels que Galilée lui-même les a exprimés :

« Salviati : Je doute beaucoup qu'Aristote ait jamais vérifié par l'expérience s'il est vrai que, lorsqu'on laisse tomber au même instant d'une hauteur, par exemple, de 100 coudées, deux pierres dont l'une pèse 10 fois autant que l'autre, leur vitesse de chute serait si différente que, lorsque la plus lourde aurait atteint le sol, l'autre n'aurait pas parcouru plus de 10 coudées. »

Les doutes de Galilée au sujet de la chute des

corps avaient commencé lorsque, étant jeune, il avait remarqué certaines particularités du pendule. Il avait constaté d'abord que le temps nécessaire pour aller d'un côté à l'autre et en revenir (la *période*) est à peu près le même, quelle que soit l'amplitude des oscillations. Une étude plus poussée lui avait montré que, tant que la longueur de la corde restait la même, le poids du pendule n'avait aucune importance. La période du pendule *était indépendante* de son poids. Comme le déplacement d'un pendule est très analogue à celui d'un corps en chute libre, excepté que le pendule est contraint de décrire un arc de cercle, Galilée était fortement persuadé que le poids n'influait pas la vitesse de chute d'un corps quelconque.

Nous constatons ici une différence remarquable entre Galilée et les philosophes de la nature qui l'ont précédé. Galilée savait qu'il ne suffisait pas d'être « persuadé » ; il devait prouver par une expérience la véracité de son intuition. Avant Galilée, on arrivait d'ordinaire à la « vérité » par la pensée pure qui n'était ni aidée, ni vérifiée par l'observation. Il est surprenant que Kepler ait modifié sa théorie pour l'ajuster aux observations de Tycho Brahé, mais il était plus inouï encore, à l'époque, de faire délibérément une expérience pour vérifier une théorie ; c'est pourquoi on appelle quelquefois Galilée le premier savant moderne.

L'expérience.

D'après une légende — qui fournit souvent des exemples pour les manuels de physique — Galilée pour prouver sa théorie serait monté au sommet de la tour penchée de Pise (voir figure 9) et en aurait laissé tomber deux boules de même diamètre, mais de poids très différent. La foule aurait vu les deux boules toucher le sol au même moment et, impressionnée, aurait été convaincue. En fait, Galilée était beaucoup plus précis que cela. S'il a réellement fait une expérience à la



Figure 9. — La tour penchée de Pise. Galilée y a peut-être fait une démonstration de sa théorie en laissant tomber du haut de cette tour deux boules à la fois; il en a prouvé l'exactitude par des mesures sur des plans inclinés.

tour de Pise, ce n'était pas pour prouver l'exactitude de ses théories, mais seulement pour donner un exemple spectaculaire de leur application. Il fallait, pour satisfaire Galilée, une précision beaucoup plus grande.

Partant du fait qu'un corps tombant d'une certaine hauteur h a la même vitesse quand il touche le sol que s'il avait roulé le long d'un plan incliné de pente quelconque *mais* de la même hauteur h , Galilée se mit à faire des expériences sur des plans inclinés. Ses plans étaient moulés et creusés de rainures. Nous laisserons Galilée décrire lui-même son expérience par la bouche de Salviati.

« Après avoir réalisé cette rainure très droite, très lisse et très bien polie, et après l'avoir recouverte de parchemin, également aussi lisse et aussi poli que possible, nous avons fait rouler dans cette rainure une boule de bronze dure et lisse. Ayant placé le plan dans une position inclinée... nous avons fait rouler la boule... en notant le temps nécessaire pour la descente. Nous avons répété cette expérience plusieurs fois afin de mesurer le temps avec une telle exactitude que l'écart entre deux observations ne dépassait jamais le dixième de la durée d'un battement de cœur. » (voir figure 10).

Galilée ne se contentait pas d'une expérience faite à la diable ! Remarquez comme il insiste sur

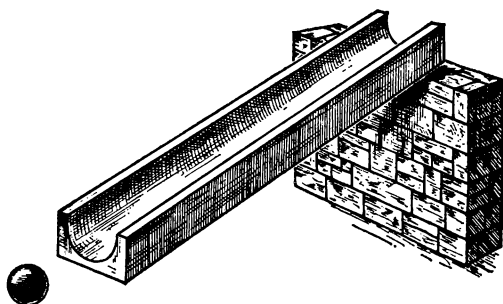


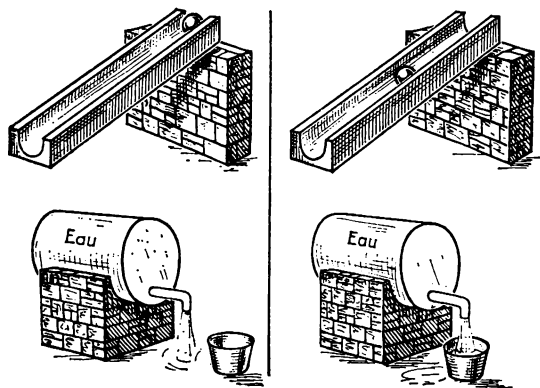
Figure 10. — L'expérience de Galilée. La boule roule dans une gouttière inclinée et on mesure la durée de la descente.

le polissage dont il avait besoin pour réduire le frottement au point que son effet devienne négligeable. Comme vous pouvez l'imaginer, la mesure exacte du temps posait un problème à Galilée ; à cette époque, il n'y avait absolument aucune horloge précise. Galilée fut obligé de recourir à une clepsydre, c'est-à-dire à une horloge à eau ; ce procédé ingénieux remplaçait l'horloge par le seul instrument exact dont il disposait, la balance. On pourrait dire que Galilée « pesait » le temps. Nous lui laisserons expliquer comment ce résultat extraordinaire a été obtenu.

« Pour la mesure du temps, nous avons employé un grand vaisseau plein d'eau placé dans une position surélevée, au fond duquel était soudé un tuyau de petit diamètre, donnant un mince jet

LA GRAVITATION

d'eau que nous recueillions dans un petit verre pendant la durée de chaque descente, soit pour toute la longueur de la rainure, soit pour une partie seulement. L'eau ainsi recueillie était pesée après chaque descente sur une balance très précise ; les différences et les rapports de ces poids nous donnaient les différences et les rapports des temps et cela avec une telle exactitude que, bien que l'opération ait été répétée de très nombreuses fois, il n'y avait aucun écart appréciable entre les résultats. »



Un réservoir d'où s'écoulait un courant constant d'eau, un récipient placé sous ce courant seulement pendant la descente de la boule, telle était l' « hor-

loge » de Galilée (voir figure 11). Il restait le problème d'établir le rapport entre le poids de l'eau et le temps. Etant admis que plus il y avait d'eau dans le récipient, plus le temps écoulé était long, Galilée devait encore convertir le poids en temps. Il tourna cette difficulté en se servant uniquement de rapports. Les différentes quantités d'eau recueillies pendant les descentes étaient *proportionnelles* à leur durée. En comparant le poids de l'eau recueillie pendant une descente avec celui de l'eau recueillie pendant une autre, Galilée put

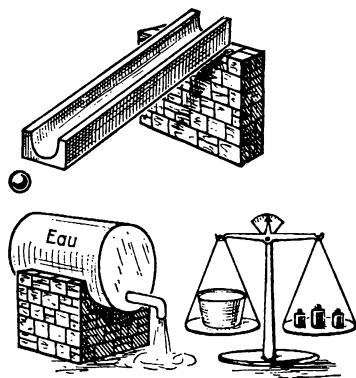


Figure 11. — Comment on « pèse » des intervalles de temps. Avant que la boule commence à descendre, le gobelet de verre est vide; au moment où elle est lâchée, on le place sous le jet d'eau; au moment où la boule arrive en bas, on enlève le gobelet et on le pèse. Comme le courant d'eau est régulier, la quantité d'eau contenue dans le gobelet est proportionnelle au temps écoulé.

se débarrasser des unités gênantes de poids et de temps et obtenir des résultats exprimés seulement en rapports. Il pouvait dire, par exemple, que le

temps nécessaire à la boule pour descendre le premier quart de la rainure était égal à la moitié du temps nécessaire pour descendre la totalité.

Une équation de la chute des corps.

Qu'apprit Galilée de ces expériences faites avec soin ? En premier lieu, il put établir une relation mathématique entre la *distance* parcourue par la boule et le *temps* nécessaire pour la parcourir :

$$\frac{\text{première distance}}{\text{seconde distance}} = \frac{(\text{premier temps})^2}{(\text{second temps})^2}$$

ou

$$\frac{d_1}{d_2} = \frac{t_1^2}{t_2^2}$$

Cela signifie que si la boule a descendu 8 pieds de rainure en une demi-seconde, il lui faudra 1 seconde pour descendre 32 pieds de la même rainure.

Enfin, la loi de la chute des corps pouvait s'exprimer par une équation. Elle ne racontait pas toute l'histoire de la gravitation, loin de là, mais, comme un physicien ne prendra au sérieux aucune notion qui ne peut s'exprimer par une équation,

on peut dire que les expériences de Galilée ont donné naissance à l'idée de gravitation.

Un résultat très important des expériences de Galilée était que la vitesse de chute des boules ne dépendait pas de leur poids. L'intuition de Galilée était exacte, *les boules lourdes ne tombent pas plus vite que les boules légères*. Beaucoup de contemporains de Galilée ne purent accepter ce résultat même lorsqu'ils en virent la preuve de leurs propres yeux. Le monde n'était pas encore préparé à une science fondée sur l'expérimentation.

Vous pourriez vous demander — et Galilée se demanda — quelle situation peut donner naissance à une équation comme celle que nous venons d'écrire ? Si vous examinez cette formule, vous pouvez constater qu'il est possible de la récrire pour une seule descente :

La distance de la chute est proportionnelle au carré du temps de chute.

ou
$$d = kt^2$$

Nous arrivons à cette équation par le même raisonnement qui nous a servi à passer de la première forme de la troisième loi de Kepler à celle donnée page 39. Le sens de l'équation apparaît plus facilement lorsqu'elle est mise sous cette forme.

Une différence importante.

Vous remarquerez que l'équation

$$d = kt^2$$

qui exprime la relation entre la distance et le temps pour un corps en chute libre est toute différente de la vieille formule familière :

La distance est égale à la vitesse multipliée par le temps.

ou

$$d = vt$$

Cette équation, qui vous a servi à l'école primaire, n'est vraie que pour un corps se déplaçant à une vitesse *v constante*, bien que personne, très certainement, ne vous l'ait fait remarquer à cette époque. Il y a une grande différence entre ces deux équations : dans l'un des cas la distance est proportionnelle au temps, dans l'autre elle est proportionnelle au *carré* du temps.

Accélération.

Galilée se rendit compte que, puisque la loi de la chute des corps peut se mettre sous la forme :

$$d = kt^2$$

ils doivent être soumis à une accélération constante.

Avant d'arriver à cette conclusion, il fallait que Galilée eût une idée claire de la notion d'accélération ; en fait, il fut le premier à comprendre son importance dans l'étude du mouvement des corps. Ses idées sur le sujet prirent naissance quand il comprit qu'un corps, une fois mis en mouvement, continuera à se déplacer si une force quelconque n'intervient pas pour l'arrêter ou, en d'autres termes, *aucune force n'est nécessaire pour maintenir constante la vitesse d'un corps*¹. Or, c'était là exactement le contraire de ce qu'Aristote avait enseigné : l'idée de sens commun qu'une force *est* nécessaire pour maintenir un corps en mouvement. Ce fut Newton qui montra clairement qu'Aristote avait tort et que Galilée avait raison ; il énonça ce principe explicitement dans sa première loi du mouvement.

S'il n'y a pas besoin d'une force pour prolonger le mouvement, que *fait* une force ? Elle produit une accélération ! Galilée reconnut également ce fait auquel Newton donna une forme mathématique dans sa seconde loi du mouvement. Une force appliquée à un corps lui imprime une accé-

1. Alors pourquoi ne pouvons-nous pas réaliser le mouvement perpétuel ? Parce que, dans le monde réel, des forces de frottement existent qui ralentissent tout ce qui se déplace. Le mouvement se maintiendrait sans application de force bien plus longtemps dans le vide où la résistance de l'air est pratiquement nulle. Meilleur sera le vide, plus longtemps persistera le mouvement.

lération proportionnelle à sa masse. Qu'est-ce exactement que l'accélération ? L'accélération est la rapidité avec laquelle la vitesse vectorielle change (On appelle vitesse vectorielle la vitesse considérée non seulement en grandeur, mais en direction et pouvant donc être représentée par un *vecteur*). Vous pouvez dire que la vitesse d'une voiture est de 80 km à l'heure, mais, pour indiquer sa vitesse vectorielle, il faut dire, par exemple, qu'elle va vers le nord à 80 km à l'heure. L'accélération peut être la rapidité avec laquelle la vitesse varie en *grandeur* mais elle peut aussi être la vitesse avec laquelle elle varie en *direction*, de sorte que, même si le corps a une vitesse constante en grandeur, il peut subir une accélération. La figure 12 montre les trois façons dont une voiture peut subir une accélération.

L'accélération peut être constante ou non. Lorsque la circulation est intense, l'accélération d'une voiture n'est en général pas uniforme. Elle peut rouler à 15 km à l'heure pendant 5 minutes, monter ensuite à 40 km pendant 10 minutes, puis arriver à une grande route et filer à 100 à l'heure. Son accélération n'est pas constante. Calculer la distance parcourue par la voiture est alors plus difficile que dans le cas d'une accélération uniforme, par exemple au départ. Au début, sa vitesse est 0, une seconde après, sa vitesse est de 15 km à

LA CHUTE DES CORPS

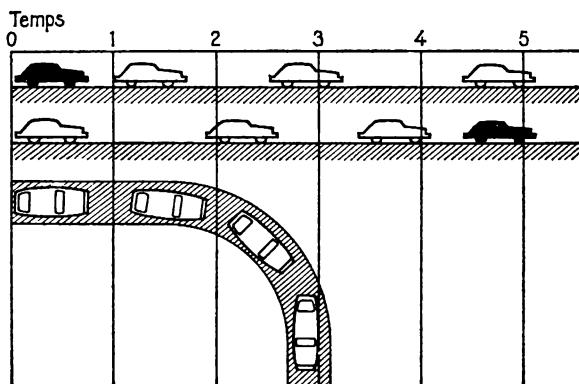


Figure 12. — Trois façons dont une voiture peut accélérer. Dans le dessin du haut, la voiture parcourt, dans des intervalles de temps égaux, des distances de plus en plus grandes. Dans celui du milieu, les distances sont de plus en plus petites. Dans celui du bas, la distance parcourue reste la même, mais la direction change.

l'heure, deux secondes après de 30 km, trois secondes après de 45 km. Comme vous voyez, cette accélération *est* uniforme, elle est de 15 km à l'heure par seconde. Lorsque l'accélération d'un corps est uniforme, il est facile de la déterminer : on soustrait la vitesse au départ de la vitesse finale et on divise par le temps pendant lequel ce changement s'est produit :

$$a = \frac{v \text{ finale} - v \text{ initiale}}{t}$$

Mouvement accéléré.

Maintenant que nous savons définir l'accélération, nous sommes mieux placés pour revenir aux calculs ultérieurs de Galilée. La question qui se posait à lui était : de combien un corps en mouvement uniformément accéléré se déplace-t-il en un temps donné ? Dans ce cas, nous ne pouvons utiliser la formule

$$d = vt$$

parce que, le mouvement étant accéléré, la vitesse n'est, par définition, pas constante. *Que peut-on donc faire pour calculer la distance ?* Galilée montra que, pour sortir de cette difficulté, il fallait *modifier* l'équation. Tant que l'accélération est constante, on peut remplacer la vitesse v par la vitesse moyenne pendant la durée du mouvement, qui se calcule très facilement en soustrayant la vitesse initiale de la vitesse finale et en divisant par deux. Comme, dans les problèmes qui nous intéressent, la vitesse initiale est nulle, la vitesse moyenne est égale à la moitié de la vitesse finale ; ce qui conduit, pour la distance parcourue par un corps en mouvement uniformément accéléré et partant du repos, pour atteindre la vitesse finale v , à la formule :

$$d = \frac{vt}{2}$$

Comme la vitesse initiale est nulle, nous savons, d'après la formule que nous venons de donner dans la section précédente pour l'accélération, que

$$a = \frac{v}{t}$$

donc

$$v = at$$

Si cette valeur de v est insérée dans la formule ci-dessous pour d , nous obtenons :

$$d = (at) (t/2)$$

ou

$$d = \frac{at^2}{2} \text{ (si l'accélération est constante).}$$

Ce qui est vraiment intéressant dans cette équation, c'est qu'elle a la même *forme* que l'équation $d = kt^2$ qui donne la distance parcourue pendant un certain temps t par un corps qui tombe. Dans les deux cas, la distance est proportionnelle au *carré* du temps (la lettre a dans l'équation ci-dessus représente l'accélération qui, rappelons-le, est constante ; c'est pourquoi nous disons que d est proportionnel à t^2). Galilée en conclut

que les corps tombent avec une intensité de pesanteur constante. Ils tombent de plus en plus vite, mais la variation de la vitesse pendant des temps égaux est toujours la même.

L'intensité de la pesanteur.

On appelle intensité de la pesanteur et on représente par g l'accélération particulière qui est celle des corps en chute libre. On peut alors récrire la première équation de la page 59 sous une meilleure forme

$$d = \frac{gt^2}{2}$$

Diverses méthodes, que nous exposerons dans le chapitre 6, permettent de déterminer la valeur de g qui est :

$$g = 9,8 \text{ mètres par seconde.}$$

Une nouvelle espèce de force.

Comme nous l'avons vu quelques pages plus haut, le fait que le mouvement d'un corps est accéléré implique qu'une *force* agit sur lui. Lorsqu'il s'agit de forces mécaniques, vous pouvez

souvent les voir en action : vous pouvez voir une balle frappée par une raquette ou de la terre déplacée par un bulldozer. De même, quand Galilée comprit que les corps qui tombent sont accélérés, il savait qu'une force agissait sur eux et que, si ses yeux ne lui permettaient pas d'en connaître l'origine, elle n'en était pas moins réelle. Il s'agit de la pesanteur, force invisible qui imprime aux corps une accélération vers le centre de la Terre.

La masse et le poids.

Jusqu'ici, nous avons employé les mots « masse » et « poids » sans les définir. Au point où nous sommes arrivés, il est possible de montrer la relation entre les deux. La masse d'un corps mesure la quantité de matière qu'il contient ; son poids, d'autre part, est la force qu'exerce la Terre sur cette masse. Le poids p d'un corps sur la Terre est défini à partir de sa masse m par la formule :

$$p = mg$$

La force (poids) est égale à la masse multipliée par l'accélération ; nous avons déjà signalé en passant ce fait que nous retrouverons dans le chapitre suivant.

CHAPITRE QUATRE

LA GRAVITATION UNIVERSELLE

La théorie de la gravitation universelle n'a pas pris forme immédiatement et complètement dans l'esprit d'Isaac Newton tout de suite après la chute de la fameuse pomme. Hélas, rien n'est aussi simple, même pour un génie ! La chute de la pomme *déclencha* un ensemble de circonstances qui étaient magnifiquement favorables à la production de nouvelles idées. Avant d'avoir reçu son diplôme à l'université de Cambridge en 1665, Newton avait établi la formule bien connue du binôme, qui porte son nom. A la fin de cette année, la tête pleine de la science du passé, ayant déjà réalisé des choses qui lui donnaient confiance en lui, Newton reçut subitement la bénédiction de la solitude et de loisirs immenses. La pomme rappela

à Newton la question qui occupait beaucoup les penseurs de cette époque : La gravité n'est-elle qu'un phénomène terrestre ? Ses effets se faisaient ressentir à toutes les hauteurs atteintes par l'homme ; pouvait-il en être de même en dehors de la Terre ? La Lune était-elle sujette à cette loi ? Etait-il possible, se demandait Newton, que ce soit l'attraction terrestre qui maintienne la Lune dans son orbite ? Et pour quelle raison les orbites des planètes étaient-elles elliptiques ? Newton se rendait compte que, une fois en mouvement, une planète continuerait à se déplacer en ligne droite, mais, pour suivre une trajectoire courbe, la planète devait être influencée par une force. Quelle était cette force ? Pouvait-elle être la gravitation ? Et cette force se faisait-elle sentir dans tout l'univers ? C'étaient là quelques-unes des questions qui vinrent à l'esprit du jeune homme pendant un long séjour forcé à la campagne.

Woolsthorpe.

La raison des vacances de Newton était la Grande Peste qui, pendant la courte période de juillet à septembre 1665, avait tué plus d'un dixième de la population de Londres. A l'automne, on ferma l'université de Cambridge par crainte

de la peste et Newton rentra dans sa maison familiale de Woolsthorpe où il était né le 25 décembre 1642. On pourrait s'imaginer que, loin de la stimulation de l'université, Newton interromprait ses travaux scientifiques. Ce ne fut absolument pas le cas ! En fait, il n'y a peut-être jamais eu dans l'histoire de la science une période de dix-huit mois aussi productive que le séjour de Newton à Woolsthorpe. En novembre, il avait déjà jeté les bases du calcul différentiel. En janvier 1666, il avait résolu le problème de la dispersion de la lumière blanche par un prisme ; en mai, il commença à créer le calcul intégral. C'est au cours de la même année que lui vint l'idée à laquelle son nom a toujours été lié, celle de la gravitation universelle. Tous ces travaux ne sont pas seulement importants ; Newton créait de nouvelles façons de penser.

Lorsqu'il rentra à Cambridge au début de 1667, ce fut comme membre du corps enseignant. Il commença alors à montrer sa tendance caractéristique à garder ses travaux secrets. Il avait une grande résistance à publier quoi que ce soit et ne le faisait que pour établir sa priorité. La seule exception concerna sa construction d'un télescope. A l'époque, la lunette astronomique était seule en usage et, en remplaçant la lentille par un miroir, on éliminait les franges colorées gênantes. Dans

un mémoire où il décrivait son télescope, Newton publia un résumé de ses expériences sur les prismes et la conclusion à laquelle il était arrivé que la lumière blanche est composée de lumières de nombreuses couleurs. Newton, qui ne pouvait supporter la critique, fut rendu furieux par le scepticisme des savants de l'époque à l'égard de cette théorie de la couleur, ce qui le confirma dans sa détermination de ne jamais faire connaître aux autres scientifiques les résultats qu'il obtenait.

Pendant toute sa vie, Newton eut des querelles mesquines avec beaucoup des grands noms scientifiques de l'époque, surtout avec Robert Hooke, sur la question de savoir qui avait eu l'idée de l'inverse du carré des distances pour la gravitation et au sujet de travaux sur l'optique des couches minces. Ses querelles avec l'Allemand Leibniz sont bien connues ; les deux hommes avaient inventé séparément le calcul infinitésimal et revendiquaient tous les deux l'antériorité.

Les Principia et Opticks.

Malgré son caractère difficile, Newton était connu comme un homme dont les idées méritaient l'attention. L'astronome Edmond Halley, qui avait prédit l'apparition de la comète qui porte

son nom, gagna la confiance de Newton et finit par réaliser le presque impossible : il le persuada de publier un résumé complet de ses théories en mécanique. Cet ouvrage, les *Principia*, commence par l'énoncé de ce qu'on appelle aujourd'hui les lois du mouvement de Newton qui sont ensuite appliquées à diverses situations simples. C'est un véritable trésor traitant de l'hydrodynamique, des ondes, de l'origine du renflement équatorial, de la précession des équinoxes et de beaucoup d'autres sujets. La partie qui nous intéresse ici est celle où Newton tire des lois de Kepler la loi de l'inverse du carré des distances ; nous verrons bientôt comment.

Après la publication des *Principia*, en 1687, la situation de Newton dans le monde changea complètement. Au lieu d'être critiqués, ses travaux étaient maintenant acclamés. En 1705, il fut anobli et devint sir Isaac Newton. Etant membre du Parlement et directeur de la Monnaie, Newton ne pouvait consacrer que peu de temps à de nouveaux travaux scientifiques. Son grand esprit s'occupait également à des passe-temps curieux : l'alchimie, la chronologie biblique et la rédaction de brochures gardées soigneusement secrètes contre la Trinité. Néanmoins, en 1703, lorsque Hooke fut mort et enterré, Newton se hasarda à publier un autre livre, *Opticks*, que Hooke aurait sûrement déchiqueté en menus morceaux. C'est le compte

rendu d'expériences faites par Newton sur les lentilles, les prismes, les télescopes, l'optique des couches minces, la nature de la couleur, la réfraction et la diffraction, accompagné d'une interprétation de ces expériences. Nous savions, grâce aux *Principia*, que Newton était un grand mathématicien ; *Opticks* montre qu'il était tout aussi grand comme physicien expérimental. On a peine à croire qu'un seul homme ait été capable d'écrire deux chefs-d'œuvre aussi différents.

Newton passa la fin de sa vie dans l'aisance, en bonne santé et comblé d'honneurs. C'est seulement à l'âge de quatre-vingts ans qu'il fut réellement malade, à cause d'un calcul dans la vessie. Il mourut cinq ans plus tard, le 20 mars 1727, d'une nouvelle crise de la même maladie.

Newton n'était pas le seul à étudier la gravitation ; dans les cafés où les intellectuels se réunissaient pour discuter entre eux, l'idée que la gravitation pouvait se faire sentir dans tout l'univers était devenue monnaie courante, à tel point qu'il était impossible de l'attribuer à une personne plutôt qu'à une autre. La véritable difficulté était de déterminer la forme mathématique de cette force et de montrer qu'elle agissait à grande distance de la Terre.

La nature secrète de Newton était telle qu'il nous est très difficile de savoir exactement com-

ment il s'y est pris pour résoudre ses problèmes, de quels indices il est parti et par quels stades il est arrivé à ses conclusions. Il préférerait nous montrer les résultats sous une forme bien nette et bien ordonnée, comme dans ses *Principia*. Il nous a épargné les détails désagréables, mais intéressants ; nous devons essayer de les reconstituer.

Les lois du mouvement de Newton.

Newton a réalisé un tour de force stupéfiant : il a forgé lui-même les outils dont il avait besoin pour obtenir ses résultats. Ses propres travaux fantastiques et toute la mécanique classique dérivent logiquement des lois du mouvement qu'il a découvertes.

Nous ne donnerons que l'énoncé de ces lois, sans indiquer la ligne de pensée qui a conduit Newton à les déclarer exactes. Nous avons déjà parlé plusieurs fois des deux premières.

PREMIÈRE LOI DU MOUVEMENT DE NEWTON : *Un corps, une fois mis en mouvement, continuera à se déplacer en ligne droite si aucune force n'agit sur lui.*

DEUXIÈME LOI DU MOUVEMENT DE NEWTON : *La force requise pour produire une certaine accélération d'un corps est égale à sa masse multipliée par cette accélération ; force exprimée mathématiquement par l'équation fondamentale :*

$$F = ma$$

LA GRAVITATION UNIVERSELLE

TROISIÈME LOI DU MOUVEMENT DE NEWTON : Un corps exerçant sur un autre corps une poussée ou une traction reçoit de celui-ci une poussée ou une traction égale ou opposée.

Cette seconde force est appelée force de réaction.

Force centripète.

Le but de Newton était de déterminer la force nécessaire pour obliger les planètes à se déplacer sur des orbites curvilignes et non rectilignes. Nous donnons à cette force, qui attire les corps vers un centre, le nom de force *centripète*, mot qui signifie « recherchant le centre ». Vous pouvez commencer l'étude de la force centripète par une expérience simple. Si vous l'osez, faites passer *très* rapidement au-dessus de votre tête un seau à demi plein d'eau. L'eau reste dans le seau même quand celui-ci est renversé ! Pourquoi ? Ce que vous devez *réellement* vous demander, si vous réfléchissez à la situation n'est pas « Pourquoi l'eau reste-t-elle dans le seau ? », mais « Pourquoi l'eau peut-elle tomber du seau ? ». Voici ce qui se passe : En faisant tourner le seau, vous déplacez également l'eau qu'il contient (voir figure 13). D'après la première loi de Newton, l'eau continuerait indéfiniment à se déplacer en ligne droite si deux forces n'agissaient pas sur elle. L'une de ces forces est la gravitation

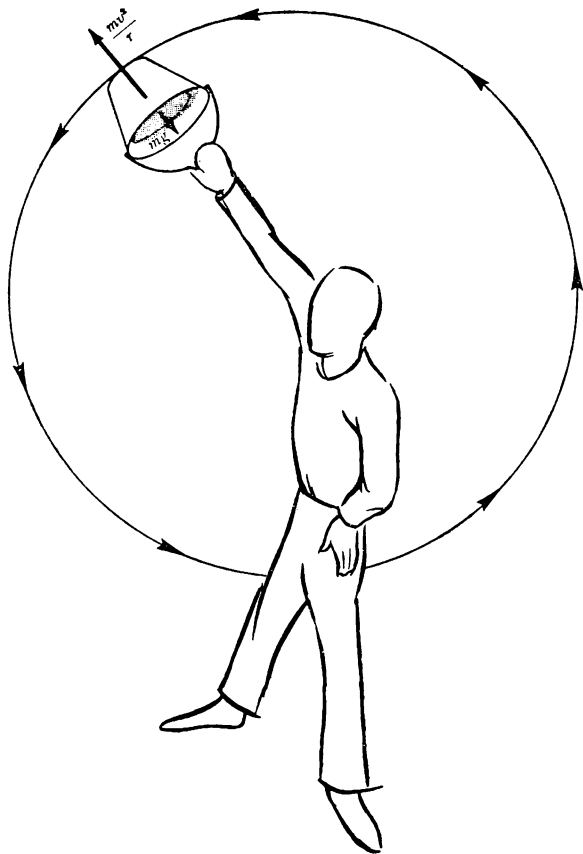


Figure 13. — Les forces qui agissent sur l'eau contenue dans un seau. Quand le seau tourne, il faut pour le maintenir une force centripète $\frac{mv^2}{r}$. Quand il est au point le plus haut, la réaction centrifuge $\frac{mv^2}{r}$ doit être au moins égale au poids de l'eau mg , sinon le seau se vide.

qui tend à faire couler l'eau sur vous. L'autre est la pression exercée sur le fond du seau. Cette force, dirigée vers l'intérieur du cercle est fournie par votre bras : plus vous faites tourner le seau rapidement, plus l'eau tend à s'éloigner de vous. En d'autres termes, la plus grande vitesse avec laquelle vous faites tourner le seau vous oblige à exercer une plus grande force centripète pour empêcher l'eau de s'échapper. Si au contraire vous ne faites pas tourner le seau rapidement, la tendance de l'eau à s'écarter de vous est si faible que lorsque le seau est au-dessus de votre tête, le déplacement de l'eau vers le haut n'est pas assez rapide pour contrebalancer l'influence de la pesanteur et vous êtes arrosé. (Cela vous est arrivé ? Oh, après tout, vous en aviez assez de ce chandail, n'est-ce pas ?)

Force centrifuge.

Nous arrivons maintenant à une curieuse erreur, que l'on trouve encore dans certains manuels. D'après ce que nous venons de dire, il peut sembler que la rotation du seau produise une espèce de force dirigée vers l'extérieur, que vous ressentez sous la forme d'une traction exercée sur votre bras. Cette force imaginaire a reçu un nom, celui de *force centrifuge* (fuyant le centre). Vous rencon-

LA GRAVITATION

trerez souvent ces deux mots dans des livres et dans des périodiques. Pourtant, même si la traction sur votre bras vous fait très mal, il importe de comprendre que les forces centrifuges ne sont que des forces de réaction aux forces centripètes nécessaires pour maintenir des objets en mouvement sur des trajectoires courbes. Les illustrations ci-dessous pourront vous aider à comprendre pourquoi une force dirigée vers l'intérieur est nécessaire pour maintenir un corps en mouvement sur une trajectoire courbe et non en ligne droite.

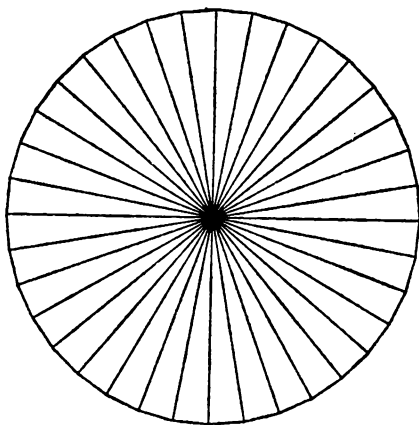


Figure 14. — On peut considérer un cercle comme un polygone d'un nombre infini de côtés, perpendiculaires à un nombre infini de rayons. Le polygone représenté ici n'a que 36 côtés et, cependant, il ressemble beaucoup à un cercle.

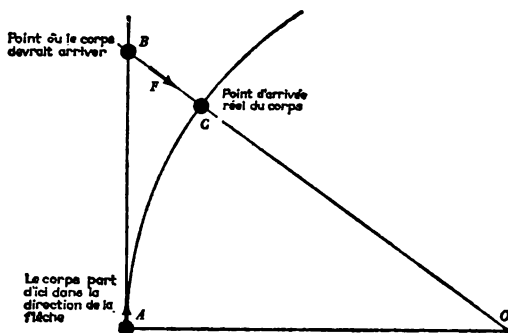


Figure 15. — Mouvement circulaire d'un corps. Une force F dirigée vers le centre doit agir sur le corps pour l'amener en C et non en B .

L'une des formes sous lesquelles on peut se représenter un cercle est celle d'un polygone ayant un nombre infini de côtés perpendiculaires à un nombre infini de rayons, comme dans la figure 14. Le croquis suivant, celui de la figure 15, montre une partie de ce cercle, agrandie. Si un corps situé en A commence à se déplacer (peu importe comment), il devrait normalement, si aucune force n'agissait sur lui, continuer à se mouvoir en ligne droite, de sorte que, plus tard, vous devriez le trouver au point B . Si, en fait, vous le trouvez non en B mais en C parce que le corps décrit un cercle du centre O , vous concluez qu'une force doit agir sur lui pour le déplacer vers le centre O .

LA GRAVITATION

L'origine de cette force dirigée vers le centre, ou force centripète, est située en O et sa valeur est :

$$F \text{ centripète} = \frac{mv^2}{r}$$

Dans cette équation, r représente le rayon de la courbe, m la masse du corps et v sa vitesse. Il est clair que, plus le mouvement du corps est rapide, plus la force nécessaire pour le maintenir sur sa trajectoire est grande. La formule ci-dessus donne la force centripète, mais on la rencontre également comme expression de la force centrifuge, puisque ces deux forces sont égales en grandeur, mais opposées en direction. Il vous est certainement facile de trouver de nombreux exemples de « force centrifuge » : le comportement d'une voiture dans un virage, le déplacement d'un petit objet léger sur un disque de phonographe en rotation, etc. Dans tous ces cas, il semble que le mouvement circulaire produise une force qui fait que les objets s'éloignent. En fait, c'est exactement le contraire. Les corps en mouvement ont tendance à se déplacer en ligne droite ; ils ne le font que s'ils ne sont pas soumis à une force suffisante pour les en empêcher.

***Des lois de Kepler
à la loi de l'inverse du carré
des distances de la gravitation.***

Revenant au problème de la gravitation, voyons comment nous pouvons utiliser ce que nous avons appris au sujet de la force centripète. Il s'agit de voir comment la troisième loi de Kepler, combinée avec l'équation de la force centripète, conduit à une formule donnant la gravitation. Au lieu de suivre exactement Newton, nous introduirons quelques simplifications, pour faciliter les choses, mais notre méthode sera la même que la sienne ; nous arriverons au même résultat et nous pourrions nous rendre compte de la valeur de son travail.

Pour simplifier, nous supposerons que les orbites des planètes sont circulaires et non elliptiques. Cela n'est pas très éloigné de la vérité, car d'abord un cercle est, comme nous l'avons vu, un type particulier d'ellipse et, dans le cas des orbites des planètes, les ellipses *sont* presque circulaires. L'avantage de cette hypothèse est que la vitesse des planètes est *constante* tandis que lorsqu'une planète décrit une orbite elliptique, sa vitesse varie, comme Kepler l'avait déjà montré. Les calculs sont alors beaucoup plus simples parce que nous pouvons utiliser la formule « la distance égale la

vitesse multipliée par le temps ». Dans cette formule, la distance est la circonférence de l'orbite, soit $2 \pi r$ où r est le rayon de l'orbite. Le « temps » est la durée d'une révolution autour du Soleil, c'est-à-dire la période T . L'équation devient alors :

$$2 \pi r = vT$$

En la résolvant par rapport à T , nous obtenons :

$$T = \frac{2 \pi r}{v}$$

En portant cette valeur de T dans l'équation qui exprime la troisième loi de Kepler, nous obtenons l'équation

$$\frac{4 \pi^2}{v^2 r} = K$$

qui, résolue par rapport à v^2 , nous donne

$$v^2 = \frac{4 \pi^2}{r K}$$

Or la force centripète (il n'est pas encore nécessaire de l'appeler gravitation) qui maintient les planètes sur leurs orbites est, d'après ce que nous avons vu dans la section précédente, égale à $\frac{m v^2}{r}$ où m est la masse de la planète, v sa vitesse orbitale et r son rayon. La vitesse de la planète vient d'être calculée et, en la remplaçant par cette

valeur dans la formule qui donne la force centripète, nous obtenons :

$$F \text{ centripète} = \frac{m (4 \pi^2)}{(K) r^2}$$

Les nombres placés entre parenthèses sont tous constants. Cette formule nous indique donc que la force centripète qui s'exerce sur la planète est proportionnelle à sa masse et *inversement* proportionnelle au *carré* du rayon de l'orbite. Plus ce rayon est grand — c'est-à-dire plus la planète est éloignée du Soleil — *plus faible* est la force centripète. Comme le rayon figure au carré dans le dénominateur, cette diminution de la force est très rapide quand la distance au Soleil augmente. Si la distance est doublée, la force tombe au quart de ce qu'elle était, comme le montre la figure 16 ; si la distance est triplée ou quadruplée, la force tombe au neuvième ou au seizième de sa valeur. On dit que la force obéit à la loi de l'inverse du carré des distances.

La gravitation et la Lune.

Maintenant que nous avons vu que le Soleil attire les planètes avec une force inversement proportionnelle au carré de la distance, nous sommes

tentés de nous demander si la pesanteur terrestre n'est pas une force analogue. Le problème, pour Newton, était de s'éloigner assez de la Terre pour pouvoir constater si oui ou non l'attraction diminuait avec la distance. La hauteur des montagnes les plus élevées qu'il pouvait escalader n'était pas suffisante pour donner une différence mesurable — de toute façon, il n'était guère un alpiniste — mais il y avait la Lune ! Si l'attraction de la Terre s'étendait jusqu'à la Lune, Newton pouvait se servir de notre satellite lui-même comme d'une partie de son laboratoire pour mesurer l'attraction terrestre.

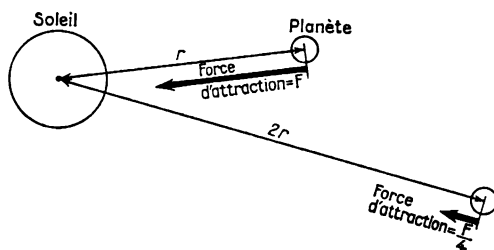


Figure 16. — L'influence de la distance sur l'attraction gravifique entre deux corps.

Newton utilisa une méthode simple et directe. Il savait calculer la force centripète qui maintient la Lune sur son orbite et, par conséquent, l'accélération centripète. Il détermina ensuite la valeur

que l'intensité de la pesanteur devrait atteindre à la distance de l'orbite lunaire *si la pesanteur terrestre obéissait à la loi de l'inverse du carré des distances*. Newton constata que ces deux valeurs étaient les mêmes ! Il put en conclure que la force centripète qui tient la Lune en laisse *est* la pesanteur terrestre et, d'autre part, que cette pesanteur *obéit* à la loi de l'inverse du carré des distances. Les calculs sont simples ; voyons comment Newton a procédé.

L'accélération centripète de la Lune.

La force centripète qui s'exerce sur la Lune est

$$F_c = \frac{mv^2}{r}$$

où m est la masse de la Lune, r le rayon de son orbite et v sa vitesse sur l'orbite. D'après la deuxième loi de Newton, cette force doit produire une accélération dirigée vers la Terre dont la valeur est, puisque $F = ma$,

$$a_c = \frac{v^2}{r}$$

Il est facile de calculer cette valeur. Nous déterminons v comme plus haut, en admettant pour

plus de simplicité que l'orbite est circulaire ; la valeur de v est, comme précédemment :

$$v = \frac{2 \pi r}{T}$$

où T est la période de la Lune, 27,3 jours, dont la durée était déjà connue du temps de Newton. En remplaçant v par cette valeur dans la dernière équation ci-dessus, on trouve

$$a_0 = \frac{4 \pi^2 r}{T^2}$$

Nous remplaçons r par sa valeur — déjà connue au XVII^e siècle — 384 000 km et T par 27,3 jours, soit $2,35 \times 10^6$ secondes, ce qui donne $a_0 = 0,0027$ mètre par seconde par seconde. C'est avec cette accélération que la Lune tombe vers la Terre, mais cette chute ne conduit jamais à une collision parce que la Lune cherche aussi à continuer son chemin en ligne droite, c'est-à-dire sur la tangente à son orbite. Cette situation est celle de la figure 15. Le corps qui part d' A et arrive en C est la Lune ; la Terre est en O . On peut considérer la distance BC comme celle de la chute de la Lune par rapport à la tangente à sa trajectoire.

L'intensité de la pesanteur sur l'orbite de la Lune.

Nous connaissons la valeur de l'intensité de la pesanteur à la surface terrestre, soit à une distance de 6 380 km du centre de la Terre ; les expériences de Galilée ont montré qu'elle est de 9,8 m par seconde par seconde. Si cette force obéit à la loi de l'inverse du carré des distances, quelle accélération provoquera-t-elle à la distance de la Lune, soit 384 000 km du centre de la Terre ? Si nous comparons les forces agissant sur la même masse m à deux distances différentes de la source, nous trouvons que leur rapport est

$$\frac{F_1}{F_2} = \frac{r_2^2}{r_1^2}$$

Comme $F = ma$, le rapport des accélérations produites par ces forces est le même puisque le facteur m figure à la fois au numérateur et au dénominateur :

$$\frac{a_1}{a_2} = \frac{r_2^2}{r_1^2}$$

Cette équation nous permet de comparer l'intensité de la pesanteur à la surface de la Terre avec

celle sur l'orbite de la Lune. Le rayon de la Terre, c'est-à-dire la distance de la surface au centre est de 6 380 km et, si nous représentons par a_1 l'intensité de la pesanteur sur l'orbite lunaire et si nous remplaçons dans l'équation ci-dessus r_1 et r_2 par leurs valeurs, nous trouvons :

$$a_1 = a_2 \frac{r_2^2}{r_1^2} = 9,8 \left(\frac{6,38 \times 10^6}{3,84 \times 10^8} \right)^2 \\ = 0,0027 \text{ mètre par seconde par seconde}$$

L'intensité de la pesanteur sur l'orbite lunaire étant exactement la même que l'accélération nécessaire pour maintenir la Lune sur son orbite, il est plus que raisonnable de supposer qu'il s'agit *effectivement d'une seule et même force.*

La gravitation est-elle universelle ?

Comme c'est la même force d'attraction qui retient les planètes autour du Soleil et la Lune autour de la Terre, nous pouvons nous demander à bon droit si cette force agit dans tout l'univers. Rien ne le prouve, mais il y a de fortes présomptions pour qu'il en soit bien ainsi. C'était également ce que pensait Newton ; pour arriver à la loi de la gravitation universelle, il a utilisé le raison-

nement suivant, qui est assez subtil ; vous pouvez le passer si vous le désirez et sauter immédiatement à la conclusion, mais vous pourriez aussi trouver intéressant de le suivre.

Quand le Soleil exerce sur une planète une force F_g , cette planète, d'après la troisième loi de Newton, exerce sur le Soleil une force égale. Qu'est-ce que cela signifie exactement ? La force F_g est proportionnelle à la masse m de la planète, comme le montre l'équation de la p. 74. (Vous remarquerez que nous avons adopté pour F centripète une notation nouvelle et plus simple, F_g , la lettre g signifiant gravitation). D'autre part, la force de réaction F_r exercée par la planète sur le Soleil est proportionnelle à la masse du Soleil M , puisque $F_r = Ma$. Or, ces deux forces sont égales ! Par conséquent, *chacune* des deux forces est proportionnelle à la fois à la masse de la planète et à la masse du Soleil. Cela nous permet de récrire l'équation de la p. 74 sous la forme

$$F_g = \frac{GmM}{r^2}$$

Cette équation rassemble les informations que nous possédons sur la force d'attraction s'exerçant entre la planète et le Soleil et admet notre ignorance de la valeur *exacte* de la constante de pro-

portionnalité que nous appelons *constante de gravitation* et que nous représentons par G .

Newton était d'avis que G se révélerait être une constante universelle et que l'équation ci-dessus serait valable pour deux corps quelconques de l'univers ; c'est pourquoi il énonça sa loi de la gravitation universelle

$$F = \frac{m_1 m_2 G}{r^2}$$

où m_1 est la masse du premier corps, m_2 la masse du second et r la distance séparant leurs centres.

Depuis lors, les scientifiques ont toujours utilisé cette loi, à l'affût d'une occasion où elle pourrait être violée ; jusqu'à présent, cela n'est jamais arrivé.

CHAPITRE CINQ

LA GRAVITATION ET LE SYSTEME SOLAIRE

Le dernier chapitre nous a montré que la force de la gravitation ne se limite pas à la Terre ; c'est une force d'attraction entre tous les corps, quelle que soit leur masse, grande ou petite. Plus voisins ils sont, plus grande est la force. Lorsque vous dites qu'une pomme est attirée par la Terre, ce n'est pas tout ; il faut ajouter que la Terre est aussi attirée *par la pomme*. La force d'attraction déplace beaucoup moins la Terre, extrêmement lourde, que la pomme, très légère ; c'est pourquoi l'attraction de la pomme est presque négligeable. Comme vous pouvez l'imaginer, la constante de la gravitation G est vraiment très petite. Il est étonnant que, dès 1797, un savant amateur, lord Cavendish, ait pu la mesurer.

L'expérience de Cavendish.

La figure 17 est le croquis d'un appareil analogue à celui de lord Cavendish. Deux petites sphères de même masse m sont reliées par une tige très légère, suspendue par un fil arachnéen ; pendant l'expérience, la rotation de la tige est tout juste visible. Pour la mesurer avec plus de précision, on place sur le fil un petit miroir éclairé par une source lumineuse (*voir figure*) dont la lumière

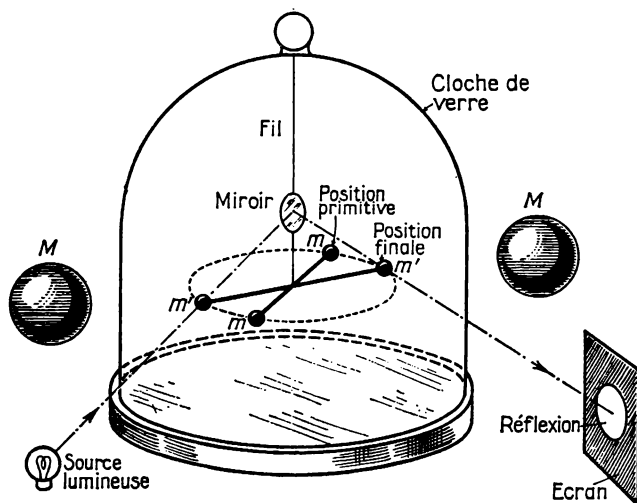


Figure 17. — L'expérience de Cavendish. Quand on approche les masses M de la cloche de verre, la tige légère et les masses m passent de la position mm à la position $m'm'$.

est réfléchi sur un écran éloigné. Un très faible mouvement de la tige se traduit par un déplacement beaucoup plus grand de la tache lumineuse sur l'écran. Le tout est placé sous une cloche de verre qui le protège des courants d'air. De grosses sphères de masse M sont suspendues à l'extérieur de cette cloche et on peut modifier leur position par rapport à l'axe de suspension des petites sphères.

Pour réaliser l'expérience, on attend d'abord que le système soit au repos. Lorsque tout mouvement a cessé, on déplace les sphères extérieures d'un angle connu par rapport à l'axe de l'appareil, c'est-à-dire au fil de suspension. A cause de l'attraction mutuelle, les petites sphères se déplacent vers les grosses et la tige tourne d'un angle incroyablement faible (c'est à cause de cette rotation de la tige, et par conséquent de la torsion du fil qui la suspend, que les petites sphères ne peuvent se déplacer jusqu'au point le plus voisin des grosses ; le fil présente une certaine résistance à la torsion). Il en résulte que la lumière réfléchi par le miroir se déplace d'une quantité très petite, mais mesurable. A partir de cette mesure, et connaissant d'autre part la force nécessaire pour produire une torsion donnée du fil, Cavendish put calculer la force d'attraction s'exerçant entre les sphères. A partir de cette valeur et des masses des sphères,

Cavendish calcula, grâce à la formule de la gravitation universelle de Newton, la valeur de la constante de gravitation G . Il est admirable qu'une expérience spécifique ait pu permettre de déterminer une grandeur aussi générale que la constante de gravitation, la même dans tout l'univers. C'est certes là une des grandes beautés de la physique !

Cavendish avait obtenu pour G la valeur $6,75 \times 10^{-8}$ dans le système C.G.S. dont les unités fondamentales sont le centimètre, le gramme et la seconde. Comparez ce chiffre avec celui admis aujourd'hui, de $6,67 \times 10^{-8}$. Pas du mauvais travail pour un amateur ! Dans cet ouvrage, nous utilisons en général le système mètre-kilogramme-seconde ou système M.K.S. dans lequel la valeur de G est $6,67 \times 10^{-11}$.

Les forces de gravitation sont minimes.

La constante multiplicative G étant très petite, l'attraction qui s'exerce entre des objets, même fort lourds, est très faible. Par exemple, quelle est l'attraction (due à la gravitation) entre un ami et vous ? Supposons que la distance qui vous sépare soit de 100 mètres (si la distance est moindre, les

calculs deviennent très difficiles). Lorsque deux corps sont suffisamment éloignés, nous pouvons supposer qu'ils se comportent comme des sphères dont la masse est concentrée en leur centre. Supposons que l'un de vous pèse 75 kg et l'autre 55 kg. En portant ces valeurs et celle de G dans l'équation de Newton (p. 84), nous obtenons :

$$F = \frac{m_1 m_2 G}{r^2} = \frac{55 \times 75 \times 6,67 \times 10^{-11}}{100^2} \\ = 0,0275 \text{ millième de milligramme}$$

La force d'attraction entre votre ami et vous n'est donc que de 0,0275 millième de milligramme. Néanmoins, *c'est* la gravitation et non l'amour qui mène le monde.

Comment on a pesé la Terre.

Cela peut sembler incroyable, mais nous avons maintenant assez d'informations pour peser la Terre. Il suffit pour cela de combiner la deuxième loi du mouvement de Newton et la loi de la gravitation universelle. Imaginons un corps de masse m tombant près de la surface de la Terre ; soient g l'accélération imprimée au corps, r le rayon de la Terre et M sa masse. Il suffit d'exprimer les deux lois ci-dessus pour obtenir

LA GRAVITATION

$$F = mg = \frac{G m M}{r^2}$$

ces deux équations nous donnent :

$$M = \frac{r^2 g}{G}$$

Nous connaissons la valeur de toutes les grandeurs figurant au second membre ; il suffit d'effectuer les calculs pour avoir :

$$M = 5,98 \times 10^{21} \text{ tonnes métriques}$$

Cette énorme quantité est la masse de la Terre.

Centre de gravité.

Vous avez appris d'abord que c'est l'attraction du Soleil qui fait que les planètes décrivent des orbites autour de lui. Maintenant que vous savez que les planètes exercent de même une force sur le Soleil, vous pourriez vous demander logiquement si le *Soleil* n'est pas aussi en orbite autour de la *planète* — nous revenons à Ptolémée — et si la Terre n'est pas, aussi, en orbite autour de la Lune. Si vous pensez cela, vous avez raison ! Naturellement, la Terre, étant beaucoup plus lourde que la Lune, se déplace peu. Si vous essayez

de vous représenter la Lune tournant autour de la Terre en 27 jours pendant que la Terre, en même temps, tourne lentement autour de la Lune, vous voyez comme c'est compliqué. Essayez de faire un schéma de *cela* ! Heureusement on *peut* ramener ce mouvement à quelque chose de beaucoup plus simple.

Comme les orbites de la Lune autour de la Terre et de la Terre autour de la Lune ont des périodes différentes, chacun de ces astres tourne autour d'un centre *mobile*, c'est pourquoi le mouvement est si compliqué. Il existe cependant un point, appelé le centre de gravité, autour duquel les deux corps ont la même période de rotation. Vu de chacun d'eux, ce point paraît immobile. Où se trouve-t-il ? Entre la Terre et la Lune, et comme la première a un mouvement plus lent que la seconde, il doit être plus voisin de la Terre. Celle-ci, quoique plus lente, est donc « à la corde » et peut par conséquent décrire son orbite dans le même temps que la Lune, plus rapide. Lorsque deux corps se déplacent l'un par rapport à l'autre, nous pouvons toujours déterminer un centre de gravité et, vus de ce point, les mouvements paraissent simples (voir figure 18).

LA GRAVITATION

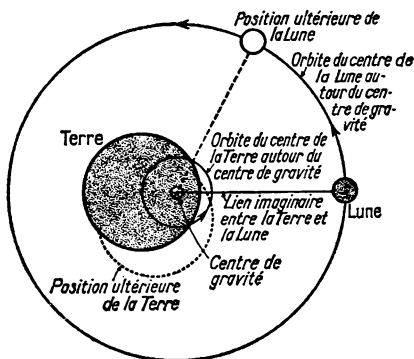


Figure 18. — La Terre et la Lune tournant autour de leur centre de gravité commun (indiqué par une croix). Le centre de la Terre décrit l'orbite indiquée autour du centre de gravité, tandis que la Lune décrit, autour du même centre, un cercle beaucoup plus grand. La Terre et la Lune se déplacent comme si elles étaient liées l'une à l'autre comme les boules d'un haltère. Les lignes en trait plein indiquent la position initiale de la Terre et de la Lune; les lignes en traits interrompus, une position ultérieure.

Détermination du centre de gravité.

Pour trouver la position exacte du centre de gravité, on peut se représenter les deux corps aux deux extrémités d'une balançoire imaginaire sans poids (voir figure 19). Le centre de gravité est à l'endroit où il faudrait placer le point d'appui pour que la balançoire soit en équilibre. Comme la Terre est bien plus lourde que la Lune, par exemple, elle devrait se trouver beaucoup plus près du

point d'appui pour que l'équilibre soit réalisé. Si nous appelons D la distance du centre de la Terre au centre de la Lune et d la distance du centre de la Terre au centre de gravité, M la masse de la Terre et m la masse de la Lune, nous pouvons calculer d au moyen de l'équation de l'égalité des moments, qui est, dans le cas présent :

$$Md = m (D - d)$$

En la résolvant par rapport à d , on trouve :

$$d = \frac{m}{m + M} D$$

Calculons la valeur numérique de d . Nous avons vu un peu plus haut que la masse de la Terre est de $5,98 \times 10^{21}$ tonnes métriques, celle de la Lune de $7,34 \times 10^{19}$ tonnes et que D est égal à 384 000 km. En portant ces valeurs dans l'équation ci-dessus, on trouve pour la distance entre le centre de la Terre et le centre de gravité $d = 4\,570$ km. Or, le rayon de la Terre, qui est voisin de 6 380 km, dépasse cette valeur. Le centre de gravité se trouve donc *à l'intérieur* de la Terre ! Lorsque nous avons supposé antérieurement que la Lune tournait autour du centre de la Terre, nous n'étions pas loin de la réalité ! Il en est de même pour le Soleil : le centre de gravité de tous les couples Soleil-planète est à l'intérieur du Soleil,

LA GRAVITATION

sauf dans le cas de Jupiter, dont la masse est très grande.

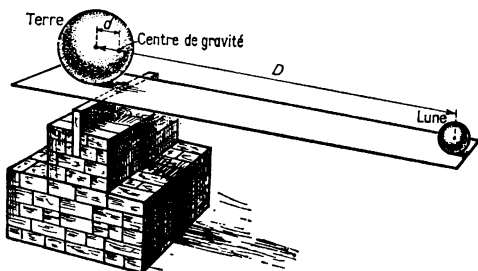


Figure 19. — La Terre doit être beaucoup plus proche du point d'appui que la Lune pour que l'équilibre soit réalisé. Le dessin n'est pas à l'échelle.

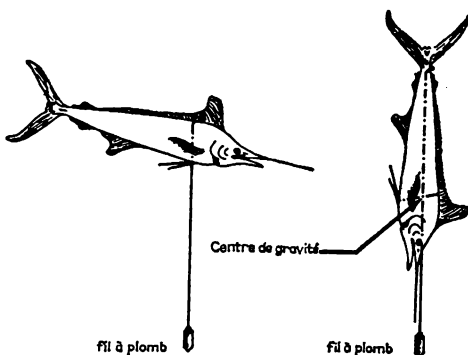


Figure 20. — Comment trouver le centre de gravité d'un corps de forme irrégulière : tracer, dans deux positions différentes, les droites déterminées par le fil à plomb; le centre de gravité se trouve à l'intérieur, sous l'intersection de ces droites.

La notion de centre de gravité est très utile en physique non seulement parce qu'un groupe de corps se meut autour de son centre de gravité, mais aussi parce que, si une force extérieure est appliquée à ce groupe, il se déplace comme si toute sa masse était concentrée en ce centre. On n'a donc à déterminer que la trajectoire d'un seul point et non celles d'un système. Un corps solide unique se déplace lui aussi comme si toute sa masse était concentrée au centre de gravité qui, si le corps est symétrique et a une densité constante, est confondu avec le centre géométrique du corps. S'il n'en est pas ainsi, on peut déterminer la position du centre de gravité soit à l'aide du calcul intégral par une espèce de calcul de moyenne, soit, si c'est possible, en suspendant successivement le corps par deux au moins de ses points et en faisant passer un fil à plomb par chaque point. Le centre de gravité est alors à l'intersection des droites déterminées par les fils à plomb (figure 20).

La période de rotation autour du centre de gravité.

En introduisant la notion de centre de gravité, nous avons remplacé par un modèle nouveau l'ancienne idée de la Lune tournant autour de la

Terre. Dans ce modèle, les deux astres se comportent plutôt comme les deux boules d'un haltère, ainsi que nous l'avons vu dans la figure 18. Liés par la gravité, ils se déplacent ensemble comme un haltère jeté en l'air (si vous pouvez imaginer *cela*) tournant autour de son centre de gravité. Le temps que met la Lune à décrire une orbite autour de la Terre est remplacé par le temps mis pour tourner autour du centre de gravité ; ces deux périodes sont presque les mêmes, mais pas exactement. La Terre, elle aussi, tourne autour de ce centre de gravité, dans le même temps. Il est facile de calculer la durée de cette période à partir du fait que la force de réaction centrifuge de chacun des deux corps par rapport au centre de gravité est égale à leur attraction mutuelle. Comme vous êtes peut-être maintenant saturé de calculs, nous dirons seulement que, pour deux corps quelconques de masses m_1 et m_2 , dont les centres sont éloignés d'une distance r , la période de chacun d'eux par rapport au centre de gravité de l'ensemble est donnée par l'équation :

$$(m_1 + m_2) \frac{T^2}{r^3} = \text{constante}$$

Comme vous vous en souvenez, la troisième loi de Kepler (p. 39) permet de déterminer la durée de rotation des planètes autour du Soleil. Si vous

comparez cette loi avec la formule ci-dessus, vous voyez qu'elle n'est pas tout à fait exacte, puisque la somme $m_1 + m_2$ a une valeur différente pour chaque couple Soleil-planète. D'autre part, les masses des planètes sont si petites par rapport à celle du Soleil qu'on peut les négliger et l'équation ci-dessus se réduit alors à

$$m_1 \frac{T^2}{r^3} = \text{constante}$$

Comme la masse du Soleil m_1 est elle-même constante, on peut la faire passer dans le second membre, qui reste constant et l'équation devient :

$$\frac{T^2}{r^3} = \text{constante}$$

la constante du second membre n'étant naturellement pas la même que celle de l'équation précédente. On retrouve ainsi la loi déduite par Kepler de l'observation.

Quand il s'agit de corps de masse analogue, il faut employer la forme exacte de l'équation, tenant compte des deux masses. Nous l'utilisons en pratique lorsque, en mesurant la période de certaines *étoiles doubles*, nous arrivons à déterminer les masses stellaires ; c'est là l'un des très rares moyens qui nous permettent de nous faire une idée de la masse des étoiles.

Etoiles doubles.

Il n'est pas facile de peser des étoiles qui sont si éloignées qu'un rayon lumineux met plus de quatre ans pour franchir la distance entre la Terre et la plus voisine d'entre elles (et *rien* ne va plus vite que la lumière) ! Les astronomes veulent cependant connaître leurs masses. Heureusement, beaucoup d'étoiles sont assez voisines les unes des autres pour que l'attraction gravifique mutuelle se fasse sentir et les amène à tourner les unes autour des autres. Dans certains cas, nous pouvons mesurer la période de ces étoiles doubles et la distance entre leurs centres. En remplaçant les lettres par ces nombres dans l'équation de la section précédente, nous pouvons déterminer la *somme* des masses des deux étoiles. Cette donnée n'est pas aussi inutile qu'elle peut le sembler, car elle nous donne au moins une idée des masses individuelles. Nous savons d'une part que les deux masses ne sont pas, d'ordinaire, très différentes, de sorte que chacune d'elles est à peu près la moitié de la masse totale. En adoptant l'hypothèse opposée, celle où l'une des masses *est* beaucoup plus grande que l'autre, le chiffre trouvé pour la masse totale constitue une limite supérieure. Quand on ne savait absolument rien sur les masses des étoiles, des

informations, même aussi imprécises que celles-ci, étaient fort utiles. De plus, il arrive que l'observation des étoiles doubles nous permette de calculer séparément la masse de *chacune* des deux étoiles ; c'est le cas lorsque les distances r_1 et r_2 entre les étoiles et le centre de gravité sont observables. Il est possible alors de déterminer le rapport m_1/m_2 à partir de l'égalité des moments :

$$\frac{m_1}{m_2} = \frac{r_2}{r_1}$$

Connaissant à la fois la somme et le rapport des masses, il est facile de résoudre ce système de deux équations à deux inconnues et d'en tirer les valeurs de m_1 et de m_2 . On a obtenu ainsi la masse d'un assez grand nombre d'étoiles. Cette méthode s'est révélée plus fructueuse encore quand les astronomes ont constaté qu'il existait une relation entre la masse d'une étoile et son éclat. A partir des valeurs déjà connues de la masse et de l'éclat d'un certain nombre d'étoiles doubles, ils purent tracer une courbe qui leur permit de déterminer la masse des autres étoiles par une simple mesure d'éclat ! Chose assez curieuse, bien que les étoiles varient énormément quant à leur diamètre, à leur température et à leur densité, leur masse varie très peu : d'un dixième à dix fois celle du Soleil.

La découverte de Neptune et de Pluton.

Les corps célestes sont influencés non seulement par leurs voisins visibles, mais aussi quelquefois par les compagnons invisibles de leurs voyages célestes. Dans ce cas, les anomalies de leur mouvement permettent de déceler la présence de l'autre astre. C'est ainsi qu'on a découvert Neptune.

Après la découverte — par hasard — de la planète Uranus, en 1781, les astronomes l'observèrent pendant plusieurs années pour déterminer son orbite. Tenant compte de ses interactions avec le Soleil et avec ses voisins les plus proches, Saturne et Jupiter, ils purent prédire sa trajectoire future. Leur foi dans la théorie de la gravitation de Newton et dans leurs calculs était telle qu'ils ne furent guère surpris de voir Uranus apparaître là où ils l'attendaient avec la régularité d'un paquebot faisant escale pendant quarante ans dans les ports prévus. Puis, à la déconvenue générale, Uranus s'écarta lentement de l'orbite prévue et les astronomes furent obligés de revoir leurs calculs. N'ayant découvert aucune erreur, ils arrivèrent à la conclusion que ou bien Newton s'était trompé, ou bien un objet céleste non observé attirait Uranus en dehors de la trajectoire attendue. Deux

astronomes, Urbain Leverrier, en France, et John Couch Adams, en Angleterre, ne reculèrent pas devant l'énorme travail nécessaire pour déterminer la position et la masse d'un corps capable de produire la déviation observée. Adams envoya ses résultats à l'« Astronomer Royal » d'Angleterre, avec l'espoir qu'un de ses subordonnés chercherait à vérifier le calcul par l'observation ; ce monsieur avait probablement dans l'esprit d'autres choses plus importantes et il n'accorda aucune attention au mémoire d'Adams. Entre-temps, Leverrier avait envoyé ses résultats à un jeune astronome allemand, Johannes Galle, qui, en 1846, trouva rapidement un objet céleste peu visible très près du point prédit par Leverrier. Cet objet se révéla être la huitième planète, à laquelle on donna le nom de Neptune. L'« Astronomer Royal » trouva aussi la planète là où Adams avait annoncé qu'elle devait être. Leverrier et Adams se partagent l'honneur de cette découverte.

Quand Neptune à son tour commença à s'écarter de l'orbite prévue, on supposa naturellement qu'il existait encore une autre planète inconnue. Toutefois, les écarts étaient si faibles qu'il était très difficile de déterminer sa position d'une façon précise. Elle ne fut découverte qu'en 1930, si éloignée du Soleil qu'elle était dans les ténèbres exté-

LA GRAVITATION

LE SYSTÈME SOLAIRE

<i>Distance moyenne du Soleil (en mil- lions de km)</i>		<i>Diamètre moyen (en milliers de km)</i>	<i>Masse par rapport à celle de la Terre</i>	<i>Période (durée de la révolu- tion autour du Soleil)</i>
Soleil		1 384	333 000	
Lune	(b)	3,46	0,01	27½ jours
Mercure	58	4,8	0,05	88 jours
Vénus	108	12,4	0,82	225 jours
Terre	150	12,8	1,00	365 jours
Mars	228	6,7	0,11	687 jours
Jupiter	777	143	318	12 ans
Saturne	1 430	121	95	29 ans
Uranus	2 880	50	15	84 ans
Neptune	4 500	45	17	165 ans
Pluton	5 900	13 (?)	0,9 ?	248 ans

(a) Vitesse minimale nécessaire pour échapper définitivement au champ gravifique de l'astre.

(b) La distance moyenne entre la Terre et la Lune est de 384 000 km.

LA GRAVITATION ET LE SYSTÈME SOLAIRE

<i>Jour (durée de la rotation sur son axe)</i>	<i>Densité moyenne (en g/cm³)</i>	<i>Intensité de la pesanteur par rapport à la pesanteur terrestre</i>	<i>Vitesse de libération (a) (en km/sec)</i>	<i>Nombre de satellites connus</i>
25-30 jours	1,4	28	613	(9 planètes)
27½ jours	3,4	0,2	1,9	—
88 jours	5	0,4	4,3	0
257 jours (c)	5,0	0,9	10,5	0
24 heures	5,5	1,0	11,2	1
24,6 heures	4,0	0,4	5,1	2
9,8 heures	1,3	2,7	61	12
10,3 heures	0,7	1,2	37	9
10,8 heures (d)	1,5	1,0	22,5	5
15,7 heures	2,0	1,4	25,5	2
16 heures (?)	5 (?)	?	?	0

(c) Vénus tourne sur elle-même en sens inverse des autres planètes.

(d) L'axe de rotation d'Uranus n'est incliné que de 8° sur le plan de son orbite.

rieures. On lui donna le nom de Pluton, le dieu des Enfers qui, lui aussi, passait sa vie dans l'obscurité. Les deux premières lettres de ce nom sont les initiales de l'astronome américain Percival Lowell, qui, l'un des premiers, avait essayé de prédire la position de la planète, qui ne fut cependant découverte qu'après sa mort.

Pluton est si éloigné qu'il est difficile de mesurer ses dimensions, mais il semble beaucoup plus petit et plus léger que ses voisins les plus proches, Uranus et Neptune. Son faible diamètre et la forme particulière de son orbite, qui passe à l'intérieur de celle de Neptune, ont suggéré à certains astronomes que ce pourrait être un ancien satellite de Neptune qui aurait échappé à l'attraction de la planète. Pour que nous soyons sûrs qu'il en est bien ainsi, il faudrait plus de données et elles sont très difficiles à obtenir à cause du grand éloignement de Pluton.

CHAPITRE SIX

LA MESURE DE L'INTENSITE DE LA PESANTEUR

Nous avons dit que g , l'intensité de la pesanteur au voisinage de la Terre, est de 9,8 mètres par seconde par seconde, mais ce chiffre n'est pas rigoureusement exact pour tous les points de la surface terrestre. La constitution géologique et, par conséquent, la répartition des masses varient toujours un peu d'un point à un autre. Les montagnes, les océans, les fosses océaniques, certains gisements de minéraux etc. provoquent des variations locales de la valeur de g . D'autre part, le globe terrestre n'est pas exactement sphérique : il est légèrement aplati aux pôles. Comme la surface est plus voisine du centre aux pôles qu'à l'équateur, g est plus grand dans le premier cas que dans le second. Le présent chapitre est

consacré aux méthodes de mesure de g et à l'utilisation pratique de ces mesures.

Pour mesurer g — ou d'ailleurs n'importe quelle autre quantité — il faut d'abord chercher des phénomènes dépendant de g et faire des expériences sur eux. Par exemple, comme l'expérience classique de Galilée l'a montré, le mouvement d'un corps qui tombe dépend directement de g et ce fait est mis à profit dans l'une des méthodes modernes de détermination exacte de cette valeur.

Lorsque nous mesurons g , nous ne mesurons pas, en fait, l'accélération due à la pesanteur seule, parce que la « pesanteur » terrestre est formée de deux parties dont la principale est celle due à l'attraction gravifique entre deux corps, l'autre étant l'accélération « centrifuge » due à la rotation de la Terre, qui dépend de la latitude : à l'équateur, elle atteint une valeur nullement négligeable, 1/3 % de la première partie, et elle diminue à mesure qu'on se rapproche des pôles. Comme ces deux accélérations sont dirigées le long de la droite reliant le centre du corps au centre de la Terre, elles sont inséparables, mais il nous est facile de calculer *a priori* l'accélération centrifuge en un point quelconque de la Terre, qu'il suffit de soustraire ensuite de la valeur mesurée.

La pseudopesanteur provoquée par la rotation d'un corps est utilisée dans les projets de véhicules

spatiaux où il est possible de réaliser une pesanteur artificielle en faisant tourner le véhicule autour d'un axe qui le traverse.

Méthodes de mesure.

Nous n'avons pas l'intention de décrire en détail les appareils actuellement utilisés pour mesurer l'accélération de la pesanteur. D'une part, les techniques changent avec le temps, de sorte que la méthode que vous apprendriez aujourd'hui pourrait fort bien être désuète avant que vous puissiez vous en servir. D'autre part, il est impossible de réaliser soi-même aucun de ces appareils. Les mesures doivent être extrêmement exactes et il s'agit donc d'instruments de haute précision. Il est cependant intéressant de passer en revue les différents types d'appareils dont on se sert aujourd'hui pour déterminer une valeur de g .

Cette mesure peut se faire sur un corps en mouvement (méthode dynamique) ou sur un corps au repos (méthode statique). L'emploi du pendule ou le chronométrage de la chute d'un objet sont des exemples de la première catégorie. Les mesures statiques se font au moyen d'une variante perfectionnée du peson à ressort ou avec un appareil appelé le gravimètre à pression gazeuse. Certains

instruments fournissent une valeur absolue de g , d'autres ne donnent que la différence entre la valeur au point où se fait la mesure et celle à une station de base.

Méthode du pendule.

La durée d'une oscillation complète d'un pendule dépend, comme Galilée l'a observé il y a bien longtemps, non du poids de la masse suspendue, mais seulement de la longueur du fil qui la soutient. Pour déterminer la relation exacte entre la période T d'un pendule et la longueur L du fil, considérons ce qu'on appelle un pendule simple (voir figure 21) ; imaginons un corps de petite dimension suspendu par un fil sans poids ; la masse de ce corps est sans influence sur la période. Le calcul donne, pour cette période, la valeur approximative :

$$T = 2 \pi \sqrt{\frac{L}{g}}$$

Il ne s'agit que d'une durée *approximative* parce que cette formule n'est exacte que pour un très petit déplacement angulaire ; plus ce déplacement est petit, plus la formule est voisine de l'exactitude.

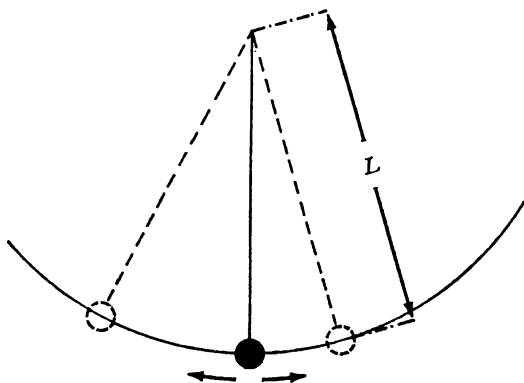


Figure 21. — Un pendule simple (théorique).

Pour les mesures de gravitation, on limite cet angle à quelques minutes (la minute vaut $1/60$ de degré) ; même dans ce cas, il faut introduire des termes de correction. En résolvant l'équation par rapport à g , on obtient :

$$g = \frac{4 \pi^2 L}{T^2}$$

S'il était possible de réaliser un pendule simple parfait, il serait facile de déterminer g en mesurant L et en chronométrant une petite oscillation du pendule, ce qui donnerait T . Dans le monde réel, la situation est plus complexe. Nous sommes obli-

gés de travailler avec des pendules réels (dits pendules composés), non des pendules théoriques. Tout corps suspendu en un point de façon à pouvoir osciller est un pendule. Le point de suspension n'est pas nécessairement extérieur au corps, comme dans le cas du pendule simple ; le corps peut fort bien pivoter autour d'un point situé en son intérieur, comme dans la figure 22 ; nous pouvons le considérer comme étant formé d'un nombre infini de pendules simples, ce qui permet de déterminer le pendule simple équivalent, c'est-à-dire le pendule simple ayant la même période que

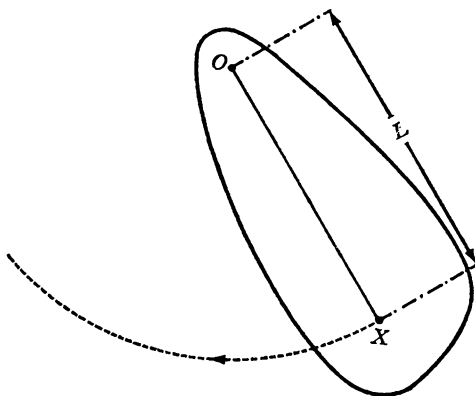


Figure 22. — Un pendule composé (réel). Ce corps, de forme irrégulière, est suspendu en l'un de ses points O . Il a la même période que le pendule simple équivalent de longueur L indiqué ci-dessus. La période reste la même si le pendule est suspendu par le point X au lieu du point O .

le pendule réel. Dans le calcul de g , on prend pour L non pas la longueur réelle du pendule, ni la distance du point d'appui à l'une ou l'autre des extrémités ou au centre de gravité, mais la longueur du pendule simple équivalent.

Comme la mesure doit être faite avec une extrême précision, il faut éliminer de petites causes d'erreur, telles que les variations de pression d'air (la mesure se fait dans le vide), celles de la température — qui affecte les mesures en modifiant la longueur du pendule — et même le fléchissement du support. Cette dernière cause d'erreur est très difficile à supprimer ; elle est due à ce que le balancement du pendule déplace le support, qui, à son tour, transmet son mouvement au pendule et modifie la période. L'appareil utilisé en réalité est très complexe.

Méthode de la chute d'un corps.

La théorie de cette méthode est très simple : l'intensité de la pesanteur est tirée de l'équation de la chute des corps établie par Galilée :

$$d = \frac{gt^2}{2}$$

qui, résolue par rapport à g donne :

$$g = \frac{2d}{t^2}$$

Dans cette méthode, la difficulté consiste à mesurer exactement le temps nécessaire à la chute du corps et la distance d qu'il parcourt. On est arrivé à une grande précision par la méthode suivante. Une règle graduée d'un ou deux mètres de long tombe dans le vide et passe devant une chambre photographique synchronisée avec une source lumineuse instantanée s'allumant 10 fois par seconde. La chambre photographie la partie de la graduation qui se trouve devant elle chaque fois que la lumière s'allume et enregistre donc la distance de chute pour chaque dixième de seconde. On assure la précision en comparant la règle graduée au mètre étalon international et en comparant l'intervalle entre les allumages au moyen d'un générateur de signaux à fréquences étalonnées. Cet appareil est représenté schématiquement par la figure 23.

Le gravimètre à pression gazeuse.

Pour déterminer la pression atmosphérique avec un baromètre, on mesure la hauteur à laquelle s'élève la colonne de mercure, qui dépend non

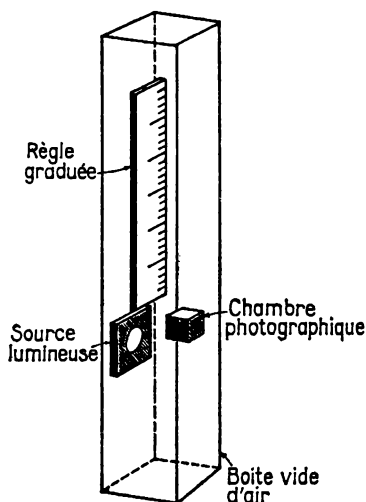


Figure 23. — Schéma de la mesure de g par la méthode de la chute d'un corps.

seulement de la pression de l'air, mais aussi de la densité du mercure et de l'intensité de la pesanteur g . Comme ces deux dernières quantités sont connues, on peut étalonner le baromètre de façon que la simple lecture de la hauteur de la colonne fournisse directement la pression. On peut aussi employer un appareil analogue en sens inverse. Si la colonne de mercure n'a pas de contact avec l'atmosphère et est reliée à un certain volume, enfermé dans un récipient, de gaz dont la pression peut être maintenue constante, les modifications de sa hauteur seront dues uniquement aux varia-

tions de g et, si cet appareil est transporté d'un endroit à un autre, les variations du niveau du mercure refléteront celles de g . C'est là le principe du gravimètre à pression gazeuse, qui mesure les valeurs relatives de g par rapport à une valeur de référence. Cet instrument n'est pas très exact, et il est surtout utilisé pour les mesures en mer où la précision de la méthode du pendule est réduite par les mouvements du navire.

Gravimètre à ressort.

Lorsqu'on suspend un poids de masse m à un ressort, celui-ci s'allonge d'une longueur qui dépend de la force de la pesanteur s'exerçant sur le poids, égale à mg , et d'une quantité appelée la constante du ressort (plus le ressort est fort, plus c est élevé). L'allongement est donné par la formule :

$$s = \frac{mg}{c}$$

La mesure de la variation de l'allongement produit par le même poids suspendu au même ressort dans des endroits différents permet de comparer les valeurs de g en ces endroits (voir figure 24).

Comme ces modifications de l'allongement sont faibles, la principale difficulté de cette méthode est de trouver un moyen d'amplifier les allongements. On a mis au point des modèles sensibles et bon marché de cet appareil, qui servent pour la prospection du pétrole.

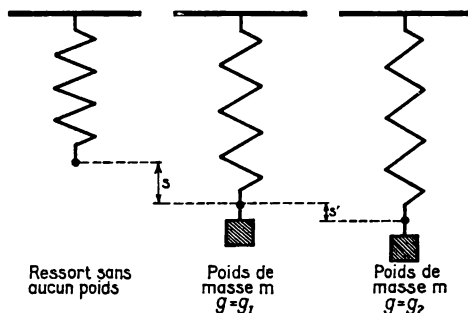


Figure 24. — Allongement d'un ressort. Le premier allongement s se produit lorsque le corps de masse m est placé à l'extrémité du ressort. Le second, s' (très exagéré sur la figure) a lieu lorsque le même ressort et le même corps sont transportés dans un autre endroit où la valeur de g est supérieure. Si la seconde valeur, g_2 , était inférieure à la première, g_1 , le ressort s'allongerait moins au lieu de s'allonger plus. La différence s' est très petite et sa mesure est difficile.

Prospection.

La densité de la surface terrestre varie d'un endroit à l'autre, suivant ce qui s'y trouve : rocher,

craie, eau, sel, or. Ces différences de densité provoquent des variations locales de la valeur de g et la mesure de l'intensité de la pesanteur en différents points peut permettre de découvrir des gisements de minéraux. Les prospecteurs ont constaté que le levé gravimétrique était une technique utile. Cependant, elle ne révèle les gisements que s'ils sont assez importants pour influencer la valeur locale de g ou si la différence de densité entre le gisement et les couches voisines est suffisamment élevée. Pour cette raison, les levés gravimétriques sont plus utiles dans la recherche du pétrole que dans celle de la plupart des minerais métalliques, bien que la différence de densité entre le gisement et ce qui l'entoure soit plus grande dans le second cas que dans le premier, mais les gisements de pétrole sont en général beaucoup plus volumineux que les gisements de minerais et cette différence compense, et au-delà, la plus faible différence de densité. Les gisements de pétrole sont quelquefois associés à des dômes de sel et, comme la densité du sel est inférieure à la densité moyenne de l'écorce terrestre, un minimum de gravitation indique la présence possible de pétrole.

Les levés gravimétriques aident aussi à la recherche de gisements de produits très denses tels que la magnétite, la chromite et les composés du baryum qui, même en assez petites quantités, don-

nent des valeurs de g beaucoup plus élevées que dans les endroits voisins.

Les fosses océaniques.

Les levés gravimétriques jouent un rôle pour l'étude des profondeurs invisibles des océans. Le fond de la mer n'est pas du tout plat. On y trouve des montagnes, des vallées et des plateaux. Dans certains endroits, on rencontre d'énormes fosses où la profondeur atteint les plus grandes valeurs connues. La plupart d'entre elles sont dans l'océan Pacifique, notamment les trois plus profondes : la fosse des îles Mariannes, la fosse du Japon et la fosse des îles Tonga ; toutes trois atteignent plus de 10 800 mètres. Leur existence a été décelée par plusieurs méthodes, notamment le levé gravimétrique : au-dessus d'une fosse, on obtient des lectures fortement « négatives », c'est-à-dire que la pesanteur est inférieure à la moyenne. La même méthode permet aussi d'identifier des caractéristiques moins spectaculaires : vallées, failles, plissements.

Cette étude nous a bien éloigné de notre point de départ, la chute des corps. Nous venons de voir que la valeur d'une chose aussi apparemment dénuée d'intérêt que l'intensité de la pesanteur

LA GRAVITATION

peut nous permettre de « voir » au-dessous de la surface de la terre et de la mer. Dans le chapitre suivant, nous reviendrons au mouvement des corps qui tombent et à leur étude, qu'on appelle la balistique.

CHAPITRE SEPT

LA BALISTIQUE

Pour commencer cette étude, il nous suffit de savoir ce que Galilée avait appris sur la gravitation et la mécanique. Comme la balistique est l'étude de la trajectoire d'un projectile se déplaçant dans un champ de gravitation et qu'un bon exemple d'un tel projectile est un boulet de canon, il n'est pas étonnant de constater que le belliqueux duc de Toscane, dont dépendait Galilée, ait encouragé ses études dans ce domaine.

Une expérience facile peut servir d'exemple d'une grande simplification que l'on peut apporter à l'étude des projectiles : la séparation de leur mouvement en deux composantes. Deux boules identiques quittent en même temps le bord de la table représentée figure 25. L'une d'elles tombe

simplement du bord, l'autre est poussée de sorte qu'elle part à grande vitesse. Laquelle des deux touche le sol la première ? La réponse est : elles touchent en même temps, bien qu'à des endroits différents. Cela signifie que nous pouvons considérer la partie horizontale et la partie verticale de la vitesse vectorielle comme complètement distinctes. La partie horizontale de la vitesse de la

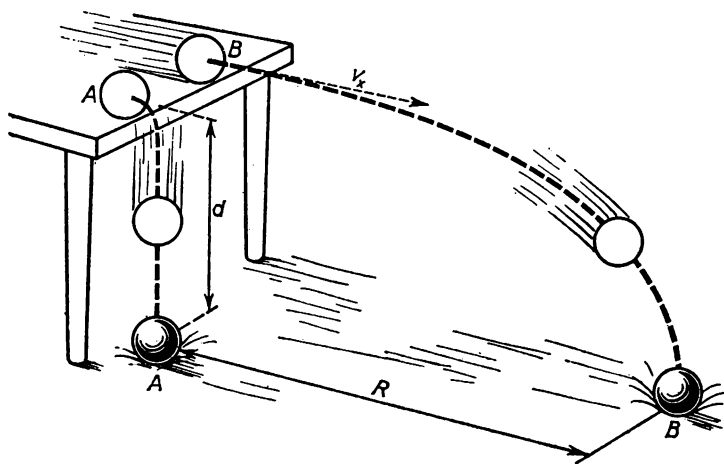


Figure 25. — Deux boules A et B tombent en même temps d'une table. La boule B a une vitesse initiale horizontale. Laquelle touche le sol la première ? Comme vous le voyez, les deux boules arrivent en même temps, mais pas au même endroit.

seconde boule est due au fait qu'elle se déplaçait déjà horizontalement au moment où elle a quitté la table et, conformément à la première loi de Newton, elle a donc continué à se déplacer à la même vitesse horizontale. Seule, la composante verticale du mouvement a été influencée par la pesanteur et les deux boules ont été influencées de la même façon, ce qui explique pourquoi elles ont mis le même temps à tomber (voir figure 26). Cette séparation en composantes verticale et horizontale peut se faire sur toute quantité *vectorielle*, c'est-à-dire sur toute quantité à laquelle est associée non seulement une grandeur, mais une direction : vitesses vectorielles, forces, accélérations.

Décomposition du vecteur vitesse.

Il est facile de déterminer la composante horizontale et la composante verticale d'une vitesse vectorielle ou de tout autre vecteur. Si nous appelons θ , une lettre grecque souvent utilisée pour représenter les angles, l'angle de la vitesse avec l'horizontale et si nous appelons v la grandeur de la vitesse, les deux composantes sont fournies par les deux formules suivantes :

$$\text{composante horizontale} = v_x = v \cos \theta$$

$$\text{composante verticale} = v_y = v \sin \theta$$

LA GRAVITATION

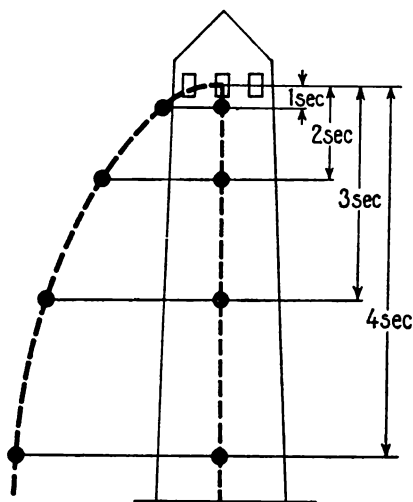


Figure 26. — Le mouvement vertical est indépendant du mouvement horizontal.

Vous savez peut-être déjà ce que sont le sinus et le cosinus d'un angle. Sinon, cela n'a pas d'importance, l'explication ne demande pas longtemps. Dans un triangle rectangle, comme celui de la figure 27, nous pouvons définir les sinus et les cosinus des angles A et B en fonction des côtés du triangle. Le sinus d'un angle est égal à la longueur du côté opposé, divisée par la longueur de l'hypoténuse ; son cosinus est égal à la longueur du côté adjacent (autre que l'hypoténuse) divisée par celle de l'hypoténuse. Pour le triangle de la figure, le sinus de A , qui s'écrit « $\sin A$ » est égal à a/c

et son cosinus, écrit « $\cos A$ » à b/c . Pour l'angle B , on a de même

$$\sin B = \frac{b}{c} \qquad \cos B = \frac{a}{c}$$

Si nous choisissons un triangle dont la longueur de l'hypoténuse est égale à 1, une fois que la grandeur d'un angle est déterminée, la longueur du deuxième et du troisième côté le sont aussi automatiquement. Par exemple, si A est égal à 30° , et si la longueur de l'hypoténuse est égale à 1, a doit être égal à $1/2$ et b égal à

$$\sqrt{3/2} = 0,866$$

Donc, le sinus de 30° est 0,5 et son cosinus 0,866. Les sinus et les cosinus de tous les angles compris entre 0° et 90° figurent dans des tables dont la consultation est facile. Ils sont toujours inférieurs ou égaux à 1.

Supposons qu'une boule se déplace à un angle de 45° au-dessus de l'horizontale, à une vitesse de 10 km à l'heure. Les équations ci-dessus nous fournissent les composantes horizontale et verticale de sa vitesse vectorielle. Le sinus et le cosinus de 45° sont égaux l'un à l'autre et leur valeur commune est $1/\sqrt{2}$, soit 0,707. La formule nous donne donc :

LA GRAVITATION

$$\begin{aligned}v_x = v_y &= 10 \times 0,707 \\ &= 7,07 \text{ km/h}\end{aligned}$$

Bien que nous ayons choisi la vitesse comme exemple de décomposition de vecteur, la méthode est la même pour tout autre vecteur, représentant par exemple la force ou l'accélération.

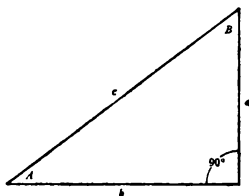


Figure 27. — Un triangle rectangle. Le côté c est l'hypoténuse.

Pourquoi décomposer les vecteurs ?

Pourquoi nous donnons-nous la peine de décomposer les vecteurs ? La figure 25 nous fournit la réponse. La trajectoire de la seconde boule n'est pas une droite, mais une courbe appelée *parabole*. Comme la direction de la vitesse change constamment, le mouvement est difficile à décrire. Si nous pouvons décomposer cette courbe en deux droites, comme nous le permet la décomposition du vecteur vitesse, le problème est simplifié. La vitesse est alors décomposée en une partie parallèle à la direction de la pesanteur et une partie perpendiculaire.

La chute des boules.

Calculons maintenant quelques nombres spécifiques qui caractérisent les trajectoires des deux boules. En premier lieu, nous avons dit que l'une et l'autre mettaient exactement le même temps pour arriver au plancher. Quel est ce temps ? Pour le trouver, nous devons nous reporter à l'équation :

$$d = \frac{gt^2}{2}$$

En résolvant cette équation par rapport à t , nous trouvons que le temps nécessaire à un corps pour tomber d'une hauteur d est :

$$t = \sqrt{\frac{2d}{g}}$$

La table a une hauteur de 75 cm ; en remplaçant d par cette valeur dans l'équation, nous trouvons pour le temps 0,39 seconde, qui est le temps requis par l'une quelconque des boules pour atteindre le plancher.

La question suivante que nous nous posons est la vitesse de la première boule au moment du choc. La seule cause de son déplacement est la pesanteur. Cette force accélère la boule de 9,8 mètres par seconde pendant chaque seconde de chute, ce qui s'exprime par l'équation de la p. 59

LA GRAVITATION

$v = at$ (puisque la vitesse initiale est nulle).
L'accélération a est celle de la pesanteur g et, en la remplaçant par sa valeur, nous trouvons :

$$\begin{aligned}v &= gt \\&= 9,8 \times 0,39 \\&= 3,8 \text{ m/sec.}\end{aligned}$$

Deux causes contribuent à donner à la seconde boule sa vitesse finale : d'une part la pesanteur qui la fait se déplacer de plus en plus vite vers le sol, comme la première boule et, de plus, elle a une vitesse initiale de, disons, 5 m par seconde, soit 18 km à l'heure dans une direction horizontale. Pour connaître la vitesse totale finale, ajoutons-nous les deux vitesses, 3,8 et 5 m par seconde ? La réponse est un NON énergique. La difficulté est que nous n'ajoutons pas des vitesses *scalaires*, mais des vitesses *vectérielles*. Les vecteurs ne sont pas des nombres ordinaires et on ne peut pas les ajouter comme des nombres ordinaires. Pour trouver la somme des deux vitesses *vectérielles*, il faut faire une addition *vectérielle*.

Addition de vecteurs.

C'est dans le cas de vecteurs représentant des forces qu'il est le plus facile de se représenter

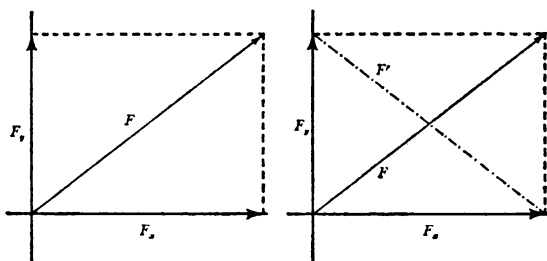


Figure 28. — L'addition de vecteurs. F est la somme vectorielle de F_x et de F_y . On la détermine en traçant des perpendiculaires (en pointillés sur la figure) à partir de l'extrémité de chacun des deux vecteurs à additionner. La résultante F va de l'origine à l'intersection de ces perpendiculaires. L'autre diagonale F' du rectangle ainsi formé est égale à F et, d'autre part, elle forme avec F_x et F_y un triangle rectangle. Nous pouvons donc, grâce au théorème de Pythagore, déterminer la longueur de F' et, par conséquent, celle de F : $F^2 = F_x^2 + F_y^2$.

leur addition. Dans la figure 28, la force F_y tire verticalement et la force F_x tire horizontalement. La force résultante F s'exerce dans la direction représentée par la figure comme vous pouviez vous y attendre. F est la somme *vectorielle* de F_x et de F_y . Nous voudrions connaître sa grandeur. La longueur de F est égale à celle de la ligne en trait mixte allant de l'extrémité de F_x à l'extrémité de F_y , puisque ce sont deux diagonales du même rectangle. Ce segment, représenté par F' forme avec F_x et F_y un triangle rectangle et, d'après le théorème de Pythagore, le carré de sa longueur est égal à la

LA GRAVITATION

somme des carrés des longueurs des côtés du triangle, ce qui nous fournit la formule permettant de calculer F :

$$\begin{aligned}F^2 &= F_x^2 + F_y^2 \\F &= \sqrt{F_x^2 + F_y^2}\end{aligned}$$

Ces équations sont exactes pour tous les vecteurs. Dans le cas de la vitesse de la seconde boule au moment où elle touche le plancher, nous avons, pour la somme vectorielle des deux composantes de sa vitesse :

$$\begin{aligned}v &= \sqrt{v_x^2 + v_y^2} \\&= \sqrt{5^2 + 3,8^2} \\&= 6,28 \text{ m/sec}\end{aligned}$$

Au moment du choc, la direction du déplacement de la boule fait un angle avec l'horizontale, comme le montre la figure 29. On peut calculer cet angle puisqu'on en connaît le cosinus :

$$\cos \theta = v_x/v$$

dans le cas présent,

$$\cos \theta = 5/6,28 = 0,79$$

l'angle qui a ce cosinus est l'angle de 37° .

Portée.

La première boule tombe juste au-dessous du bord de la table. Où arrive la seconde ? Pour calculer cette distance, appelée la *portée*, nous utilisons le fait que le mouvement horizontal est indépendant du mouvement vertical. Nous avons déjà calculé la durée de la chute de la première boule, 0,39 seconde. La seconde est restée, elle aussi, dans l'air pendant 0,39 seconde, mais elle se déplaçait horizontalement aussi bien que verticalement. Aucune force horizontale — excepté la résistance de l'air que nous négligeons — n'a agi pour accélérer ou décélérer la boule pendant ce temps ; sa vitesse horizontale a donc été constante et égale à 5 m par seconde. Puisque la vitesse est constante, nous pouvons calculer la distance par la formule :

$$d = v_x t$$

Pour éviter toute confusion avec la distance verticale d , nous appellerons cette distance, la portée, R , et nous aurons

$$R = 5 \times 0,39 = 1,95 \text{ m}$$

La seconde boule est tombée à 1,95 m du bord de la table, mais la distance totale parcourue sur sa trajectoire parabolique est de beaucoup supérieure à ce chiffre.

La trajectoire d'une bombe tombant d'un avion est analogue à celle de la seconde boule de la figure 25. La bombe a une vitesse initiale égale à celle de l'avion au moment où elle a été larguée et, comme la boule, elle ne tombe pas verticalement, mais décrit une trajectoire courbe.

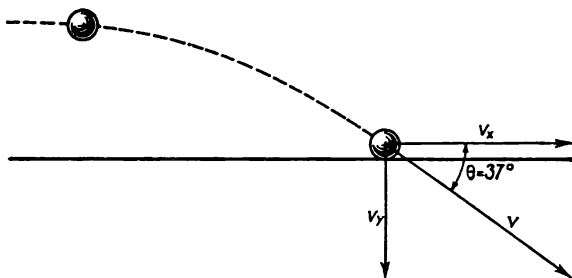


Figure 29. — Vitesse de la seconde boule de la figure 25 au moment où elle touche le sol. On voit facilement que :

$$v^2 = v_x^2 + v_y^2.$$

Fusées et autres projectiles.

Un corps projeté vers le haut est, lui aussi, un « corps en chute ». Pendant son déplacement, la pesanteur agit constamment sur lui, de sorte qu'il « tombe » en même temps qu'il s'élève. C'est ce qui se produit dans le cas d'une fusée de feu d'artifice ou d'une fusée de signalisation. Supposons

que, à l'occasion du 14 juillet, nous lançons une fusée sous un angle de 45° (voir figure 30) et que sa vitesse soit de 100 m par seconde. A quelle hauteur s'élèverait-elle si la résistance de l'air n'existait pas ? Pour le savoir, nous déterminons d'abord le temps nécessaire à atteindre le point le plus élevé de la trajectoire. Nous commençons par décomposer la vitesse initiale ; sa composante horizontale est

$$100 \cos 45^\circ = 70,7 \text{ m/sec}$$

La composante verticale est la même puisque $\sin 45^\circ = \cos 45^\circ$. La vitesse verticale de la fusée est formée de deux parties : d'une part elle s'élève à une vitesse v_v de 70,7 m par seconde, mais, en même temps, elle tombe à une vitesse accélérée sous l'influence de la pesanteur. Cette vitesse v_v augmente de 9,8 m par seconde pendant chaque seconde où la fusée est dans l'air, donc $v_v = gt$. Un moment arrive où v_v est égal à v_v , mais dans la direction opposée. La vitesse nette de la fusée est alors nulle ; elle atteint le sommet de sa trajectoire qui s'incurve ensuite vers le sol. Pour déterminer le moment où cela se produit, nous écrivons que les deux vitesses sont égales et nous résolvons l'équation par rapport à t :

$$gt = 70,7 \text{ m/sec}$$

$$t = 7,2 \text{ sec}$$

Le temps nécessaire à la fusée pour retomber de ce sommet jusqu'au sol est le même ; elle séjourne donc dans l'air pendant 14,4 secondes en tout.

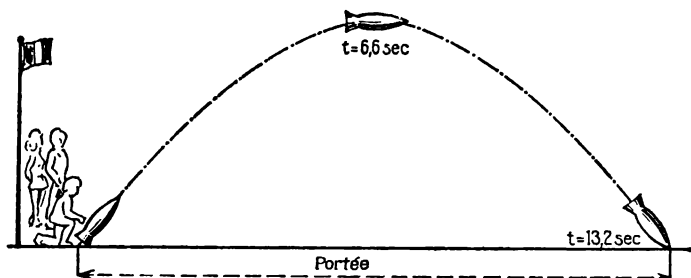


Figure 30. — Mouvement d'une fusée (pas à l'échelle).

Pour trouver l'altitude maximale atteinte, nous calculons la hauteur après un temps quelconque t . Comme la vitesse, la hauteur se divise en deux parties, la distance franchie vers le haut à une vitesse constante de 70,7 m par seconde, dont il faut soustraire la distance de chute sous l'influence de la pesanteur $gt^2/2$. La hauteur d'un projectile au temps t après son lancement est donc donnée par la formule générale :

$$h = v_y t - \frac{gt^2}{2}$$

En remplaçant v_y et t par leurs valeurs, nous trouvons :

$$\begin{aligned} h &= 70,7 \times 7,2 - 4,9 \times 7,2^2 \\ &= 255 \text{ m} \end{aligned}$$

qui est l'altitude la plus élevée atteinte par la fusée.

Portée.

Nous calculons la portée de la fusée comme tout à l'heure celle de la seconde boule. Sa vitesse horizontale est constante et égale à v_x , soit 70,7 m par seconde. Elle reste dans l'air pendant 14,4 secondes. La distance parcourue à partir du point de lancement est donc

$$\begin{aligned} R &= v_x t \\ &= 70,7 \times 14,4 \\ &= 1018 \text{ m} \end{aligned}$$

La formule générale qui donne la portée d'un projectile (obtenue en combinant tous les stades du calcul précédent) est :

$$R = \frac{2 v_o^2 \sin \theta \cos \theta}{g}$$

où v_o est la vitesse initiale du projectile et θ l'angle entre la direction de la vitesse et l'horizontale. Cette équation nous apprend une chose intéres-

LA GRAVITATION

sante sur le maximum de la portée, qui est atteint lorsque $\sin \theta \cos \theta$ est maximal ; or, la trigonométrie nous apprend que :

$$2 \sin \theta \cos \theta = \sin 2 \theta$$

La valeur maximale du sinus d'un angle est 1, qui est le sinus de 90° . La portée est donc maximale pour $2 \theta = 90^\circ$, c'est-à-dire pour $\theta = 45^\circ$. Essayez d'adopter cet angle pour projeter vos avions en papier ou pour viser avec vos pistolets à eau. Le résultat est très bon et serait encore meilleur si la résistance de l'air n'existait pas ; pour surmonter celle-ci, il faut viser un peu plus haut.

Fusées.

Vous avez sans doute remarqué, en regardant la télévision, que les fusées spatiales sont lancées verticalement vers le haut. Les hommes de science qui envoient ces fusées ne cherchent pas à obtenir la portée maximale ; leur but est que la fusée subisse le moins longtemps possible les effets de la résistance de l'air, des vents transversaux et de la pesanteur. Même à 32 km au-dessus du sol, l'intensité de la pesanteur est encore égale à 99 % de ce qu'elle est au niveau de la mer. La résistance

de l'air augmente rapidement avec la vitesse, de sorte qu'une branche importante de l'étude des fusées est la détermination d'une forme présentant le minimum de résistance à l'air.

Nous avons résumé dans ce chapitre les effets de la pesanteur *terrestre* sur les objets se trouvant sur la Terre ou à son voisinage. La Lune est assez voisine pour exercer une attraction sur les corps terrestres, mais cette attraction est si petite qu'on peut la négliger, sauf en ce qui concerne son influence sur la Terre elle-même, qui est déformée légèrement par l'attraction réciproque. Le sol ferme résiste à cette déformation, mais les océans se déplacent plus facilement. C'est là la cause des marées qui feront l'objet du chapitre suivant.

CHAPITRE HUIT

LES MAREES ET LA PRECESSION DES EQUINOXES

La Terre et la Lune tournent l'une autour de l'autre comme un grand haltère. Réunies par leur attraction mutuelle et séparées par leur rotation, elles constituent un système parfaitement équilibré. Qu'en est-il si nous considérons, non le système dans son ensemble, mais certains de ses éléments ? En particulier, quelles sont les forces qui agissent sur les parties de la Terre les plus voisines et les plus éloignées de la Lune, *A* et *B* dans la figure 31 ? Le point *A* étant distant d'environ 6 380 km du centre de la Terre, subit de la part de la Lune une attraction plus forte que le centre. La faible force de réaction centrifuge agit sur le centre de gravité, qui est très voisin de *A*, et sa direction est

la même que celle de l'attraction gravifique ; *A* se déplace donc vers la Lune. En *B*, la situation est exactement inverse : l'attraction de la Lune est moindre qu'au centre de la Terre et la réaction centrifuge plus grande, de sorte que *B* s'éloigne de la Lune. Aux autres points de la Terre, des luttes analogues entre la gravité et la force centrifuge se produisent, bien que l'effet soit maximal aux points *A* et *B* qui sont sur la droite reliant les centres des deux astres. L'effet de ces forces non équilibrées est la légère déformation « en ballon de rugby » que vous voyez (fortement exagérée) sur la figure 31.

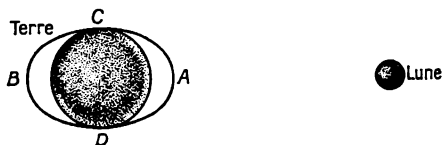


Figure 31. — Déformation de la Terre sous l'influence de l'attraction lunaire.

Le sol est rigide et ne cède pas à l'attraction aussi facilement que de la mélasse cuite, bien qu'il se déforme cependant un peu. Pour les océans, ce déplacement est beaucoup plus facile : l'eau s'accumule sur la partie de la Terre la plus voisine de la Lune et sur la partie diamétralement opposée, ce qui produit les marées.

Marées solaires.

Les marées sont produites par la composition d'une marée lunaire et d'une marée solaire. Bien que le Soleil modifie lui aussi la forme de la Terre et provoque des marées, son influence n'est qu'environ la moitié de celle de la Lune. Au premier abord, cela semble curieux, puisque l'attraction gravifique du Soleil sur la Terre est environ 200 fois celle de la Lune, mais la force qui produit les marées n'est pas une simple attraction gravifique : elle dépend de l'inverse du *cube* de la distance. Le Soleil est 390 fois plus éloigné de la Terre que de la Lune. Lorsque ce nombre apparaît *au cube* au dénominateur de la formule qui donne la force produisant les marées, même l'énormité de la masse du Soleil, 26,6 millions de fois celle de la Lune, ne suffit pas à annuler son effet. Dans le calcul de l'attraction gravifique, c'est seulement le carré de la distance qui se trouve au dénominateur, et la masse du Soleil fait plus que compenser son éloignement.

Marées de vive-eau et de morte-eau.

Environ deux fois par mois, quand le Soleil, la Lune et la Terre sont en syzygie, c'est-à-dire en

ligne droite, la marée solaire s'ajoute à la marée lunaire pour provoquer le bourrelet anormalement considérable qu'on appelle marée de vive-eau (voir figure 32a). La figure 32b montre les marées plus faibles qui se produisent quand la direction Terre-Soleil est à angle droit avec la direction Terre-Lune. La déformation se fait en partie vers le Soleil, en partie vers la Lune et les marées sont moins hautes que lorsque les deux s'ajoutent : c'est ce qu'on appelle une marée de morte-eau. Pendant les marées de vive-eau, la *marée haute* est particulièrement haute et la *marée basse* particulièrement basse, tandis qu'en période de morte-eau, la différence entre les deux est inférieure à la moyenne.

Prédiction des marées.

Il devrait être simple de prédire, pour n'importe quel point de la côte, le moment de la marée haute et de la marée basse, ainsi que les hauteurs atteintes. La Terre tournant sur son axe, un point donné de sa surface sera face à la Lune environ une fois par jour et dans la direction opposée également environ une fois par jour : nous devrions nous attendre à une marée haute à ces deux moments. Quand la rotation de la Terre a

LA GRAVITATION

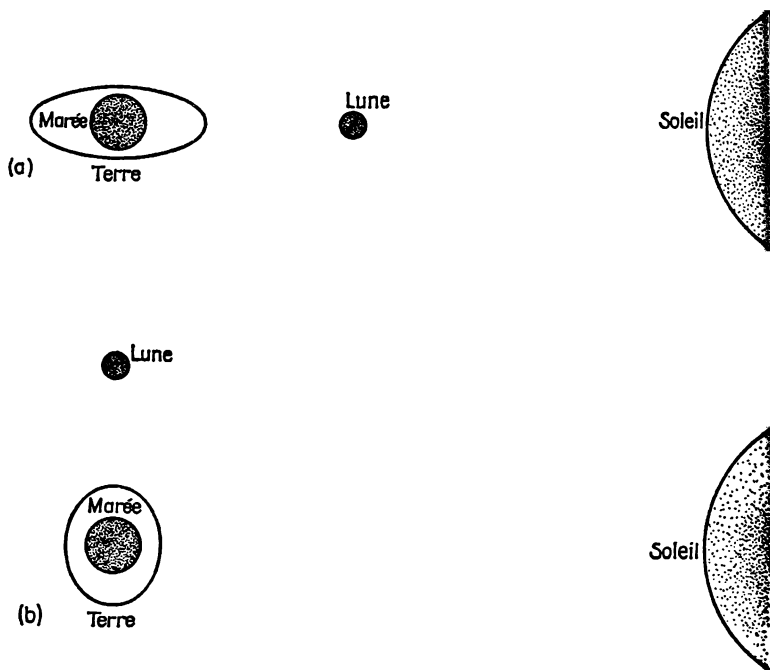


Figure 32. — Les marées de vive-eau (a) ont lieu lorsque la Lune et le Soleil sont dans la même direction et que, par conséquent, leurs influences s'ajoutent. C'est alors qu'on constate les marées les plus hautes et les plus basses. Les marées de morte-eau (b) se produisent quand la direction de la Lune est à angle droit avec celle du Soleil et que les eaux sont attirées à la fois dans les deux directions. La marée due à la Lune est plus forte que celle due au Soleil, mais aucune des deux n'est très importante. La différence de niveau entre la marée haute et la marée basse est alors moindre que d'ordinaire.

amené le point considéré en *C* ou *D* de la figure 31, nous prévoyons une marée basse. Donc, en tout point de la Terre, il devrait y avoir par jour deux marées hautes et deux marées basses, dont l'amplitude serait la même tous les jours.

Comme vous vous en êtes rendu compte maintenant, ce n'est pas aussi simple que cela dans le monde réel. Le tableau est compliqué d'abord par le fait que l'angle entre le Soleil et la Lune, vu de la Terre, varie constamment pendant le mois. Il en résulte non seulement le phénomène des marées de vive-eau et de morte-eau, mais aussi une modification de la hauteur des marées pendant la période intermédiaire. Le calcul est encore possible, puisque les positions du Soleil et de la Lune sont connues pendant tout le mois, mais notre tableau a déjà perdu sa simplicité. Une difficulté plus grande est due aux frottements irréguliers de la mer sur le fond et sur les côtes. Il n'est guère possible de calculer les retards dus à *cette* force, qui varie d'un endroit à l'autre, ni de déterminer le ralentissement ou l'accélération de la crête de la marée lorsqu'elle rencontre des hauts fonds ou des zones où la mer est profonde. Un autre facteur qui influence les marées est le frottement de la Terre qui tourne au-dessous des océans ; cette question fera l'objet de la section suivante. Enfin, la hauteur de la marée varie aussi suivant le temps qu'il fait :

un vent violent pousse l'eau devant lui, tout comme il pousse la neige pour former des congères, et le niveau de l'eau sur la côte s'élève.

Tous les gens de mer — pêcheurs, marins de la marine marchande et de la marine de guerre, plaisanciers — doivent connaître l'heure et la hauteur de la marée haute et de la marée basse. Dans des mers comme la Méditerranée et la Baltique, où les marées ne sont que de quelques centimètres, cela n'est pas très important, mais lorsqu'elles peuvent atteindre une dizaine de mètres, par exemple au large de la Bretagne ou de la Nouvelle-Ecosse, le pilote d'un navire ne peut se permettre une erreur. L'ignorance des marées pourrait l'amener à s'échouer, l'empêcher de profiter d'un courant de marée favorable ou le retarder parce que son navire devra lutter contre un courant contraire dont la vitesse dépasse parfois six nœuds. Vous voyez que la prédiction des marées n'est pas seulement un exercice intellectuel et qu'elle a une grande importance pratique. Comme il est impossible d'arriver à ce résultat par la théorie, les océanographes se fondent sur les observations. Pendant de longues périodes, ils mesurent tous les jours aux mêmes heures le niveau de l'eau dans différentes stations réparties dans le monde entier, d'ordinaire au voisinage des ports. Les fluctuations dues aux conditions météorologi-

ques se compensent. On applique à ces données les méthodes de l'analyse harmonique et on obtient ainsi une table des marées indiquant d'avance le moment et la hauteur de la marée haute et de la marée basse à chacune de ces stations.

Le frottement dû aux marées.

Malgré la rotation de la Terre, le bourrelet de l'océan dû à la marée est maintenu en place par la Lune (si l'on néglige l'influence du Soleil). La Terre tourne sous ce bourrelet et le frottement qui en résulte tend à entraîner le bourrelet dans la rotation. Ce conflit se résout comme l'indique la figure 33 : le bourrelet est entraîné par la rotation de la Terre et se trouve en avant de la position prévue. Quels sont les résultats de ce frottement ?

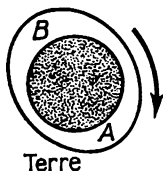


Figure 33. — La partie solide de la Terre tourne sous le bourrelet liquide créé par la marée et, à cause du frottement entre les deux, entraîne ce bourrelet en avant de la ligne imaginaire reliant le centre de la Terre au centre de la Lune. Ce frottement ralentit la rotation de la Terre et augmente donc la durée du jour.

La Terre n'entraîne pas seulement le bourrelet en avant. Celui-ci exerce une action retardatrice sur la rotation de la Terre qui est ralentie. En d'autres termes, à cause du frottement des marées, *la Terre tourne de moins en moins vite*. Il en résulte que la durée du jour augmente ! Les archives anciennes confirment cette hypothèse étonnante. Le jour s'allonge en effet, mais très lentement : au cours du dernier siècle, la variation a été d'environ 1/1 000 de seconde. Si petite qu'elle soit, cette durée n'est pas négligeable, surtout si l'on considère son effet cumulatif au cours des siècles. La demande universelle de « plus d'heures dans la journée » est donc satisfaite, mais trop lentement pour que cela nous soit de quelque utilité.

Une autre conséquence du frottement des marées est que la vitesse v de la Lune sur son orbite augmente parce que le bourrelet en A, étant devant la Lune, l'entraîne avec lui. Si v augmente, l'attraction de la Terre ne suffit plus pour maintenir la Lune sur son orbite et le rayon r de celle-ci augmente jusqu'à ce que l'équilibre soit rétabli. En d'autres termes, la Lune s'écarte graduellement de la Terre. Ici encore, le phénomène est très lent : environ 1,5 m par siècle, ce qui est fort peu de chose, sauf à très long terme. A quoi devons-nous nous attendre dans un grand nombre d'années ?

Un scientifique estime que, dans 50 milliards d'années, la Lune tournera aussi vite que la Terre et que, avant que ce résultat ne soit atteint, la Lune sera si éloignée que les marées solaires seront plus importantes que les marées lunaires. Le jour sera plus long que le mois. Tout ceci pourrait arriver uniquement à cause de l'existence des marées.

Marées terrestres et atmosphériques.

Les marées provoquent de faibles déformations de la masse terrestre qui, elle-même, provoque des variations de g , l'intensité de la pesanteur, de sorte qu'on se sert de gravimètres pour détecter les marées terrestres qui ne dépassent pas environ 30 cm à « marée haute ». Heureusement pour notre sens de l'équilibre, la déformation se fait graduellement, en une douzaine d'heures, de sorte que nos pieds ne sont soulevés en moyenne que de 2,5 cm à l'heure et nous ne nous en rendons pas compte.

Il existe aussi des marées atmosphériques, marquées par une fluctuation quotidienne de la pression barométrique.

Nous avons maintenant achevé l'étude de l'interaction du Soleil et de la Lune sur le bourrelet

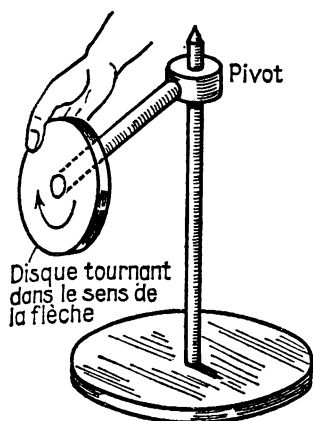
que ces astres provoquent sur la Terre et nous allons passer à leur influence sur une autre espèce de bourrelet terrestre ; c'est le phénomène appelé *précession*.

La précession.

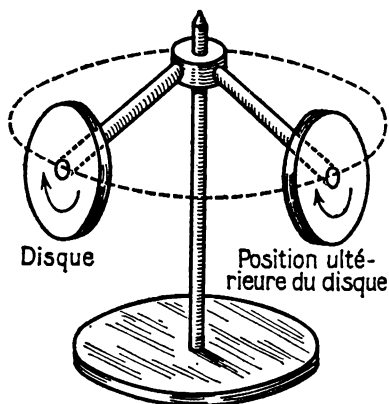
Quand vous voyez pour la première fois une démonstration de la précession, cela paraît miraculeux. Vous attendez avec curiosité qu'on vous explique ce que vous avez vu et il y a toutes chances pour que vous n'ayez aucune explication. Il est possible d'expliquer, ou tout au moins de rendre plausibles, beaucoup de phénomènes physiques par un dessin et quelquefois un peu d'algèbre, mais, pour beaucoup d'autres, il est nécessaire de recourir aux mathématiques et, en général, à des mathématiques d'un niveau supérieur à celui de l'algèbre élémentaire auquel nous nous limitons dans ce livre ; il n'existe aucun diagramme simple grâce auquel le phénomène paraîtrait soudain évident. Malheureusement, la précession appartient à cette catégorie et nous nous bornerons donc

Figure 34. — La précession. Dans le dessin a, le disque est tenu par une main, puis mis en rotation. On voit en b le mouvement du disque : au lieu de tomber, l'extrémité de l'axe fixé au disque décrit un cercle horizontal autour du support. Le dessin c représente le même mouvement, vu d'en haut.

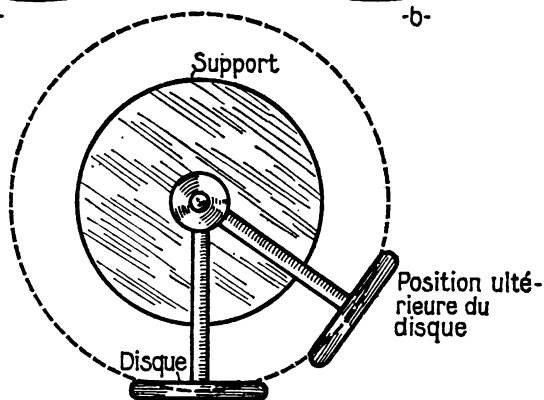
LES MARÉES ET LA PRÉCESSION DES ÉQUINOXES



-a-



-b-



-c-

à la décrire. Ne croyez pas cependant qu'elle soit due à des forces surnaturelles !

Commençons par deux toupies en mouvement. La figure 34 a vous montre que la première est assez particulière : c'est un disque au bout d'un axe. Nous commençons par tenir la toupie à la main, l'autre extrémité de l'axe reposant sur le support ; ensuite nous la faisons tourner très vite et nous lâchons. Que se passe-t-il ? Je suis sûr que, comme moi, vous pensez qu'elle tombera sur la table. Il n'en est rien, elle reste là, telle que nous l'avons laissée, conservant sans aucun support sa position horizontale.

Pourtant, *elle se déplace*. L'extrémité libre de l'axe décrit un cercle autour du support comme vous le montre la figure 34 b. Cette rotation est appelée *précession*. Vous reconnaissez probablement ici un jouet simple, le *gyroscope*. Le comportement de cette toupie est contraire à tout ce que nous pouvions prévoir d'après le sens commun et aussi d'après nos connaissances de physique. Voici une force, la pesanteur, appliquée vers le bas à la toupie et celle-ci, au lieu de tomber, se déplace lentement *de côté*, pour décrire un cercle ! C'est très bizarre !

L'autre toupie que nous étudions est du type traditionnel (voir figure 35). Tant qu'elle tourne assez vite, elle reste sur sa pointe jusqu'à ce que

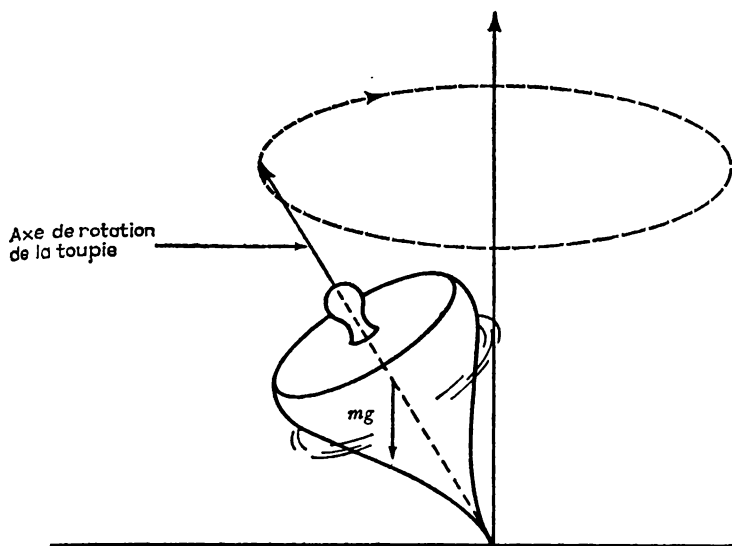


Figure 35. — Une toupie qui tourne assez vite ne tombe pas, malgré l'action de la pesanteur, égale à mg ; elle est animée d'un mouvement de précession, c'est-à-dire que son axe de rotation fait un angle constant avec la verticale et tourne autour de celle-ci en décrivant un cône, la pointe de la toupie restant en place.

le frottement la ralentisse et qu'elle tombe sur le plancher. Pendant sa rotation, elle a un mouvement de précession, c'est-à-dire que son axe tourne lentement, décrivant un cône d'axe vertical, et que sa pointe reste en place. Comme vous avez vu des toupies de ce genre depuis l'âge de deux ans, son comportement semble moins extraordi-

naire que celui de la première, mais en réalité les deux situations sont identiques. La toupie est inclinée, elle devrait tomber, mais, *tant qu'elle tourne vite*, elle semble défier la pesanteur.

Moment d'une force.

Qu'est-ce que ces toupies ont en commun ? D'une part elles ne tombent pas malgré l'action de la pesanteur, mais elles se déplacent dans une autre direction. D'autre part, non seulement une force entre en jeu, mais aussi ce qu'on appelle un *moment*. Le moment est défini comme le produit d'une force par la distance entre le point d'application de celle-ci et un point donné ou une droite donnée. Tout moment tend à faire tourner ; le schéma de la figure 36 le montre clairement. Le cas le plus simple est celui de la figure 36 a où la force est perpendiculaire à une barre ; le moment par rapport au point d'appui O est Fd . Dans la figure 36 b, la direction de la force fait un angle θ avec la barre, de sorte que, pour calculer le moment par rapport à O , nous devons prendre la composante de la force perpendiculaire à la barre qui est $F \sin \theta$, et ce moment est égal à $Fd \sin \theta$. Dans la balançoire de la figure 36 c, il y a deux moments par rapport au point d'appui. La balan-

çoire est en équilibre, donc les deux moments doivent être égaux, c'est-à-dire que :

$$F_1 d_1 = F_2 d_2$$

Vous reconnaissez peut-être là l'équation de l'équilibre des leviers.

Le moment est analogue à la force. Tandis que les forces produisent des accélérations, c'est-à-dire des vitesses de variation d'une vitesse vectorielle, les moments produisent des vitesses de variation

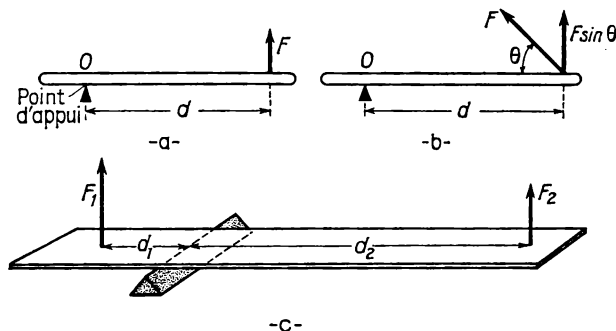


Figure 36. — Moment d'une force. En a, le moment par rapport au point d'appui est Fd . En b, il est $Fd \sin \theta$, puisque la composante de F perpendiculaire à la tige est $F \sin \theta$. En c, la balançoire est en équilibre; le moment de F_2 par rapport à la droite d'appui doit donc être égal au moment de F_1 par rapport à la même droite. En d'autres termes : $F_1 d_1 = F_2 d_2$. Remarquez que, dans les cas a et b, la tige est si mince que nous pouvons considérer qu'il s'agit de moments par rapport à un *point*, mais dans le cas de la balançoire, le moment est par rapport à une *droite*, l'arête sur laquelle la balançoire est en équilibre.

de la *vitesse angulaire* (La vitesse angulaire peut s'exprimer en tours par seconde). Si nous regardons la barre des figures 36 a et 36 b après que la force F a commencé à agir, nous constatons qu'elle tourne de plus en plus vite autour de O .

La Terre elle-même est une énorme toupie et, sous l'influence d'un moment, elle est le siège d'un phénomène de précession. Vous savez que la Terre tourne, mais d'où provient le moment ? La forme de la Terre nous fournit la réponse.

Le renflement équatorial.

La Terre n'est pas une sphère parfaite, mais, même si l'on néglige la légère irrégularité due aux marées, elle est renflée en son centre par suite de la réaction centrifuge (une bonne excuse à se rappeler si *vous aussi* avez un renflement vers le milieu). Contrairement à la déformation due aux marées, ce renflement est uniforme et ne se modifie pas au cours de la journée. Il est représenté, d'une façon exagérée, par la partie hachurée de la figure 37.

Comment la force centrifuge peut-elle produire ce renflement ? Pour y répondre, imaginons la Terre coupée en tranches, comme un oignon. La

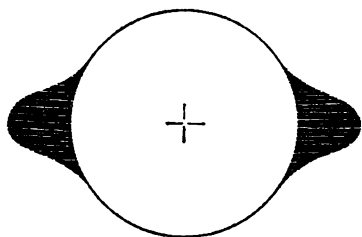


Figure 37. — Coupe de la Terre montrant (très exagéré) le renflement dû à la force centrifuge (partie hachurée).

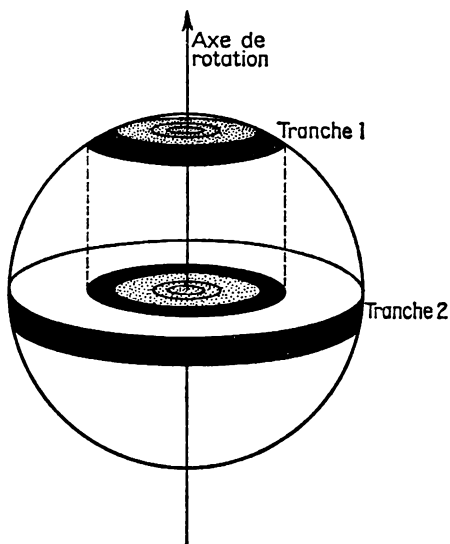


Figure 38. — La Terre divisée en anneaux : on voit que la force de réaction centrifuge est plus forte pour les tranches équatoriales que pour celles voisines des pôles.

figure 38 montre deux de ces tranches et plusieurs anneaux. Cherchons la valeur de la force centrifuge pour différents anneaux. La forme de l'équation donnée p. 74

$$F = \frac{mv^2}{r}$$

est d'un usage difficile ici, puisqu'elle dépend de la vitesse linéaire v , qui varie d'un anneau à l'autre. Nous préférierions une expression dépendant d'un nombre constant pour toute la Terre : c'est le cas de la vitesse angulaire ω qui, divisée par 2π , est le nombre de tours par seconde. Dans ce cas, la formule donnant la force centrifuge prend la forme :

$$F = m\omega^2 r$$

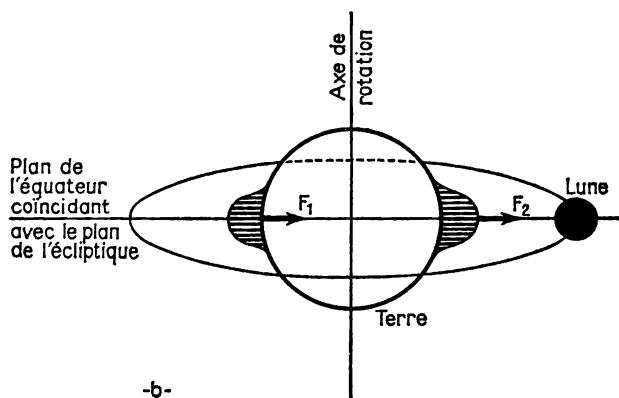
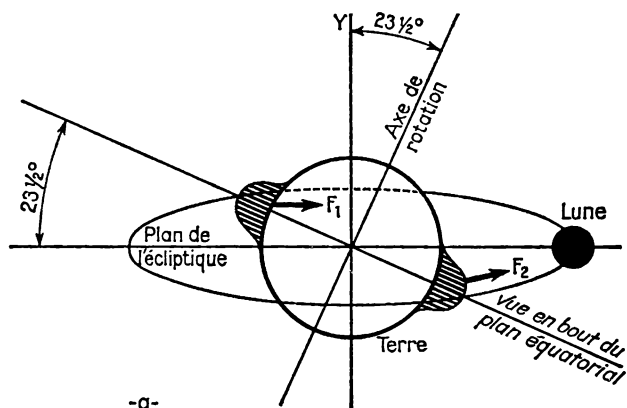
Sous cette forme, il est évident que la force centrifuge est plus grande pour les anneaux dont le rayon r est plus grand (c'est-à-dire ceux les plus éloignés du centre) que pour les autres qui sont plus proches de l'axe de rotation. L'anneau extérieur de la tranche équatoriale de la figure 38 est soumis à une force plus élevée que les anneaux intérieurs de la même tranche, ou qu'aucun anneau de la tranche 1. Pour la tranche 2 (équatoriale), la force centrifuge est la somme des forces agissant sur les anneaux intérieurs à l'anneau représenté en noir sur la figure et de celles agissant

sur ceux situés à l'extérieur. Vous voyez que la force est plus grande pour la tranche 2 que pour la tranche 1 et, d'une façon générale, que les forces tendant à provoquer le renflement sont plus grandes pour les tranches voisines de l'équateur que pour celles qui en sont éloignées. Pour cette raison, le rayon équatorial de la Terre est plus grand que le rayon polaire ; la différence est d'une vingtaine de kilomètres.

La précession des équinoxes.

C'est le renflement équatorial qui fournit au Soleil et à la Lune une « poignée » leur permettant d'exercer sur la Terre un effort de torsion, en d'autres termes, la force d'attraction a un moment par rapport au centre de la Terre. De plus, il se fait que le plan de l'équateur terrestre fait un angle de $23\frac{1}{2}^{\circ}$ avec le plan de son orbite autour du Soleil, et un angle à peu près égal avec le plan de l'orbite de la Lune. L'attraction gravifique du Soleil et de la Lune sur la partie sphérique de la Terre agit comme si toute la masse terrestre était concentrée au centre, de sorte qu'elle ne peut pas avoir de moment par rapport à ce centre. D'autre part, le Soleil et la Lune sont attirés par les différentes parties du renflement (et les attirent) comme

LA GRAVITATION



par des corps distincts : la partie du renflement la plus éloignée du Soleil ou de la Lune est soumise à une forme moindre que l'autre partie. Il en résulte un moment par rapport au centre de la Terre, comme le montre clairement la figure 39 a. Ce diagramme vous montre aussi que, si l'axe de la Terre était perpendiculaire au plan de l'orbite, comme dans la figure 39 b, les forces d'attraction provenant du Soleil et de la Lune passeraient par le centre de la Terre et n'auraient donc aucun moment autour du centre.

Si la Terre ne tournait pas, le moment dont nous venons de parler aurait pour effet de déplacer

Figure 39. — L'action de la Lune et du Soleil sur les différentes parties du renflement équatorial terrestre. Pour plus de simplicité, la Lune seule est indiquée. La figure -a- montre — pas à l'échelle — le plan de l'équateur terrestre incliné de $23\frac{1}{2}^{\circ}$ sur le plan de l'écliptique, c'est-à-dire sur le plan de l'orbite terrestre autour du Soleil, qui est aussi le plan de l'orbite décrite par la Lune autour de la Terre. Comme l'axe de rotation de la Terre est perpendiculaire au plan équatorial, il s'ensuit qu'il fait un angle de $23\frac{1}{2}^{\circ}$ avec l'axe vertical qui est perpendiculaire au plan de l'écliptique.

La force F_1 tend à faire tourner l'axe de rotation dans le sens des aiguilles d'une montre autour du centre, tandis que la force F_2 tend à la faire tourner en sens inverse. Comme la force F_2 est plus grande que F_1 , il en résulte une tendance à réduire l'inclinaison de l'axe de rotation, mais comme la Terre tourne, cet axe, au lieu de se redresser, est animé d'un mouvement de précession, comme indiqué dans la figure 40.

La figure -b- montre que, si l'axe de la Terre n'était pas incliné, la Lune (il en serait de même du Soleil) ne pourrait pas provoquer une rotation autour du centre puisque les forces agissant sur les différentes parties du renflement *passeraient par* le centre.

LA GRAVITATION

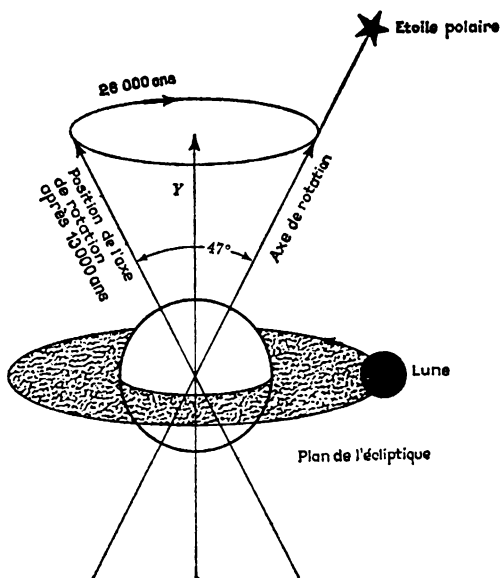


Figure 40. — La précession des équinoxes. L'extrémité de l'axe de rotation de la Terre tourne autour de l'axe vertical Y et l'axe de rotation décrit un cône dont l'angle au sommet est de 47° .

La période de la précession est de vingt-six mille ans.

l'axe de la Terre vers l'axe vertical appelé Y dans les figures 39 et 40, qui est perpendiculaire au plan de l'écliptique. En d'autres termes, il diminuerait l'obliquité de l'axe de la Terre. Toutefois, comme la Terre tourne sur son axe, elle doit se comporter comme n'importe quelle toupie : l'angle

d'inclinaison reste de $23\frac{1}{2}^{\circ}$, mais l'axe de rotation est animé d'un mouvement de précession autour de la verticale Y comme indiqué dans la figure 40. L'axe de la Terre décrit ainsi dans l'espace, en 26 000 ans, un cône dont l'angle au sommet est de 47° . Ce mouvement est lent, mais non négligeable. Le pôle Nord, c'est-à-dire la direction de la partie nord de notre axe de rotation, correspond à l'étoile polaire. Il y a 5 000 ans, au temps des Pharaons, l'axe était dirigé vers une autre étoile, Alpha du Dragon. En l'an 14 000, la brillante étoile Véga sera assez voisine du pôle pour servir d'étoile polaire aux navigateurs si, à cette époque, on navigue encore d'après les étoiles.

La précession s'est d'abord manifestée aux astronomes par le changement de position des équinoxes, c'est-à-dire des points où l'orbite apparente du Soleil rencontre le plan de l'équateur terrestre. Il y en a deux : l'équinoxe de printemps, vers le 21 mars, et l'équinoxe d'automne, vers le 21 septembre. Hipparque avait observé la variation de leurs positions dès 125 avant J.-C. mais la précession est restée inexplicable jusqu'au jour où Newton résolut le problème en appliquant sa loi de la gravitation.

CHAPITRE NEUF

LES SATELLITES DE LA TERRE

Jusqu'au 4 octobre 1957, la Terre n'avait qu'un seul satellite, la Lune. En ce jour historique, des hommes de science russes réussirent une performance remarquable : ils envoyèrent un objet fabriqué par l'homme en dehors de l'atmosphère terrestre et le mirent en orbite autour de la Terre. Quoique nous ayons été désappointés que les scientifiques américains n'aient pas été les premiers à obtenir ce résultat merveilleux, la fierté de cette réussite était plus forte que le nationalisme.

L'orbite d'un satellite.

Si nous devons lancer un satellite en espace par une grande poussée unique à partir d'une rampe de lancement située sur la Terre, nous devrions

lui donner une vitesse initiale de 7 900 m/sec, soit environ 28 400 km à l'heure. Ce nombre se calcule très simplement en égalant le poids du satellite mg à la force de réaction centrifuge $\frac{mv^2}{r}$, ce qui donne la vitesse tangentielle

$$v = \sqrt{rg}$$

En remplaçant r et g par leurs valeurs respectives, 6 400 km et 9,8 m par seconde par seconde, nous obtenons la vitesse minimale qu'un satellite doit avoir pour être placé en orbite autour de la Terre, *près de celle-ci* ; si sa vitesse était inférieure, la fusée retomberait vers la Terre comme un projectile ordinaire.

En pratique, la vitesse nécessaire pour que le satellite soit placé sur une orbite donnée ne lui est jamais imprimée d'un seul coup sur la rampe de lancement : il est transporté à l'altitude voulue par une fusée à plusieurs étages qui doit lutter non seulement contre la pesanteur, mais aussi contre la résistance de l'air, qui augmente rapidement avec la vitesse, de sorte qu'il est évidemment préférable que la fusée s'élève lentement tant qu'elle n'est pas sortie de la basse atmosphère, plus dense. La fusée accélère son allure sous l'impulsion de ses propres moteurs, qui lui permettent de partir lentement et d'atteindre ensuite

la vitesse nécessaire. Cette accélération graduelle est aussi préférable pour les instruments de bord et, éventuellement, pour tout l'équipage. Lorsque la fusée a atteint l'altitude nécessaire, il faut la faire tourner de façon que le satellite se déplace parallèlement à la terre ; si la vitesse est bien calculée, la fusée, étage par étage, retombe ensuite ; elle a achevé sa tâche, on n'a plus besoin d'elle. Si le satellite est envoyé vers l'est le long de l'équateur, sa vitesse est augmentée de celle de la rotation de la Terre, soit d'environ 1 670 km à l'heure. Aux pôles, cet avantage disparaîtrait et aux points intermédiaires, la vitesse supplémentaire dépend de la latitude.

La vitesse qui convient pour une orbite.

Un satellite dont l'orbite est éloignée aura une vitesse moindre que s'il était sur une orbite plus proche de la Terre, parce que l'action de la gravitation sur le satellite diminue avec la distance. Le tableau ci-dessous montre la relation entre l'altitude orbitale et la vitesse tangentielle nécessaire à cette altitude. La vitesse indiquée dans la première ligne est de 7 900 mètres par seconde, soit environ 28 400 km à l'heure, comme il a été dit plus haut.

L'expression « altitude nulle » signifie en fait toute altitude assez faible pour qu'on puisse considérer g comme égal à 9,8 m par seconde par seconde. De toute façon, cette valeur n'est que théorique, car aucun satellite ne sera placé en orbite quelques mètres au-dessus de nos têtes.

Altitude minimale d'une orbite.

La densité de l'atmosphère diminue avec l'altitude. A 160 km au-dessus du sol, elle n'est plus qu'environ un cent millionième de ce qu'elle est à la surface — ce qui suffit cependant à influencer l'orbite d'un satellite — mais à une altitude double, elle devient négligeable. Comme les orbites des satellites sont elliptiques, ils peuvent traverser l'atmosphère au moment où ils passent près de la Terre (voir figure 41). L'une des difficultés que rencontrent les ingénieurs consiste à maintenir le satellite en dehors de l'atmosphère dont la résistance réduit la durée utile et modifie les dimensions et la forme de l'orbite. Pour que cette durée dépasse deux semaines, l'altitude du satellite ne doit pas descendre au-dessous de 175 à 180 km.

On annonce actuellement (milieu de 1968) que le satellite de télécommunications Echo I, lancé en août 1960, va se désintégrer. Ce satellite a été

LA GRAVITATION

INFLUENCE DE L'ALTITUDE DE L'ORBITE SUR LA VITESSE ET SUR LA PÉRIODE DE RÉVOLUTION ORBITALE CIRCULAIRE

<i>Distance de la Terre (en km)</i>	<i>Vitesse (en m/sec)</i>	<i>Période (en minutes) (en jours)</i>
0	7 900	84,5
160	7 800	88
640	7 500	98
1 600	7 000	118
35 400	3 060	environ 1
370 000	1 020	27

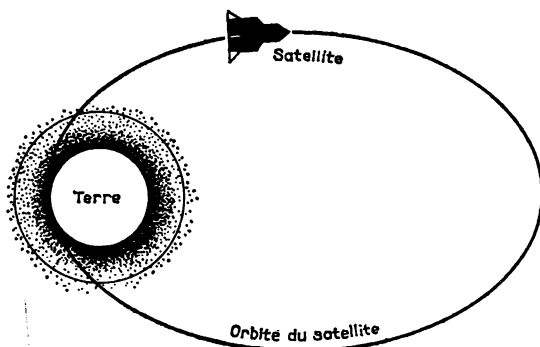


Figure 41. — L'orbite d'un satellite peut traverser l'atmosphère terrestre; il y a alors frottement sur l'air.

le premier visible à l'œil nu ; constitué par un sac de matière plastique aluminisée, il recevait encore la lumière du Soleil longtemps après que celui-ci se soit couché pour les Terriens. Au début de la soirée, il traversait le ciel comme une étoile rapide ; c'était une brillante publicité pour les réalisations de l'homme. Ce sera triste de le voir disparaître.

Précession des satellites.

Les renflements équatoriaux qui provoquent la précession des équinoxes provoquent aussi une précession par rapport à la Terre du plan de l'orbite des satellites, qui se déplace dans le sens rétrograde d'environ 2° de longitude par jour. Si le satellite pouvait tracer dans l'espace une ligne visible, comme la traînée de vapeur d'un avion, elle aurait l'aspect représenté par la figure 42. Etant donné que la précession dépend du degré de renflement de la Terre, les savants utilisent cette relation en sens inverse et observent la précession pour mesurer exactement le degré de renflement.

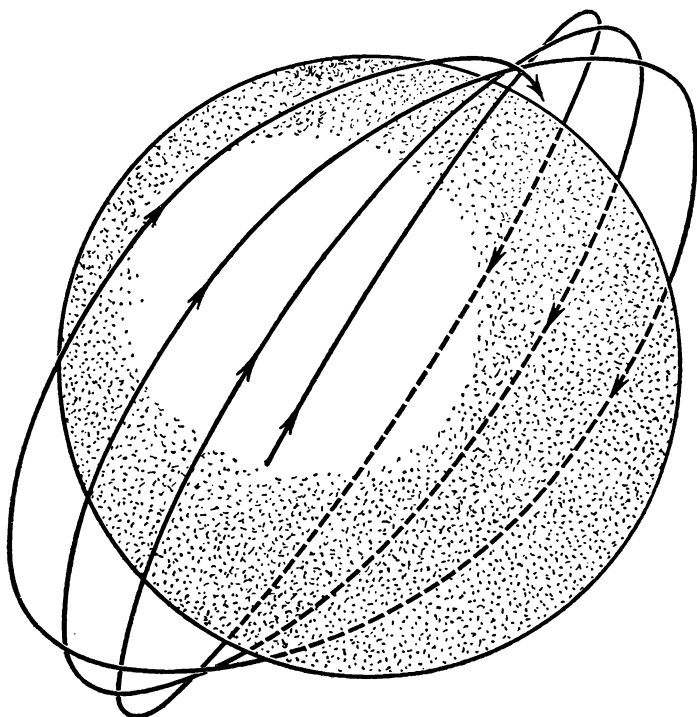


Figure 42. — Sous l'action du renflement équatorial terrestre, le plan de l'orbite d'un satellite tourne autour de la Terre.

Périodes des satellites.

Vous remarquerez sur le tableau précédent que les satellites qui n'ont pas la même orbite diffèrent non seulement par leur vitesse, mais aussi par leur période qui augmente à mesure que l'orbite est plus éloignée de la Terre. Spoutnik, le premier satellite, tournait autour de la Terre en environ 1 1/2 heure, mais cela ne signifie pas qu'il passait au-dessus de votre tête toutes les 90 minutes, car n'oubliez pas que vous aussi vous vous déplacez : vous êtes entraîné par la rotation de la Terre à une vitesse non négligeable, puisqu'elle atteint à l'équateur 1 670 km à l'heure. Pendant que le Spoutnik tourbillonnait autour de la Terre, vous ne restiez pas immobile à l'attendre : quand il revenait à son point de départ, vous vous étiez éloigné déjà d'environ 2 500 km si vous étiez à l'équateur et le Spoutnik devait vous rattraper. Il *existe* cependant une orbite dont la vitesse est telle que le satellite tourne autour de la Terre en 24 heures. Pour une personne située au-dessous de lui, le satellite semble immobile parce que la personne et le satellite tournent autour du centre de la Terre à la même vitesse ; l'altitude correspondante est d'environ 36 000 km.

Comment échapper à la pesanteur.

Les satellites dont nous avons parlé sont liés à la Terre et destinés à tourner autour d'elle jusqu'à ce qu'ils se désintègrent. Il est beaucoup plus difficile pour un véhicule spatial de se détacher de la Terre, de s'éloigner suffisamment d'elle pour ne plus être captif de son champ de gravitation. Pour étudier Vénus, pour s'embarquer dans l'un des voyages extraordinaires vers d'autres parties du système solaire qui sont proposés par les scientifiques, les sondes spatiales doivent laisser la Terre derrière elles et se mouvoir seules dans l'espace. Même pour atteindre la Lune, il faut vaincre la plus grande partie de la gravité terrestre.

Connaissant la variation de g avec la distance de la Terre, il est facile, grâce au calcul infinitésimal, de déterminer la vitesse nécessaire à un corps pour se détacher complètement de la Terre, c'est-à-dire pour arriver à une distance infinie où l'attraction terrestre est nulle (en pratique, à une distance suffisante pour que cette attraction soit négligeable). C'est ce qu'on appelle la *vitesse de libération*, qui est, pour la Terre

$$\begin{aligned} v \text{ libération} &= \sqrt{2gr} \\ &= 11\,200 \text{ m/sec} \\ &= 40\,000 \text{ km/h environ} \end{aligned}$$

La lettre r représente le rayon de la Terre, 6 380 km.

Le 2 janvier 1959, la fusée russe Lunik atteignit une vitesse supérieure à la vitesse de libération. Elle passa à moins de 5 000 km de la Lune et la laissa derrière elle, puis fut capturée par le champ de gravitation du Soleil et devint la première planète artificielle. Auparavant, les Américains avaient lancé la fusée Pioneer I, qui devait se mettre en orbite autour de la Lune, être un satellite de notre satellite. Malheureusement, le combustible de cette fusée, la première de la série Pioneer, cessa de brûler un peu trop tôt et Pioneer I n'atteignit jamais le voisinage de la Lune.

Pour mettre une fusée en orbite autour de la Lune, il faut viser non l'endroit où la Lune *se trouve* au moment du lancement, mais l'endroit où *elle sera* lorsque la fusée atteindra l'orbite lunaire (voir figure 43). La sonde doit être munie de *rétrofusées* qui réduisent sa vitesse juste assez pour qu'elle puisse se mettre en orbite autour de notre satellite. Amener une fusée sur la Lune est loin d'être facile et cependant, aujourd'hui, on lit couramment dans les journaux que des sondes ont effectivement atterri sur la Lune, que des sondes américaines ont atteint le sol lunaire si doucement qu'elles ont pu en envoyer des photographies à la Terre. Ce qui, il y a dix ans, aurait été de la science-fiction,

LA GRAVITATION

l'idée que des équipes d'astronautes s'entraînent pour atterrir sur la Lune dans le proche avenir * est acceptée aujourd'hui comme une chose banale. Quand des astronautes sont capables de rapprocher

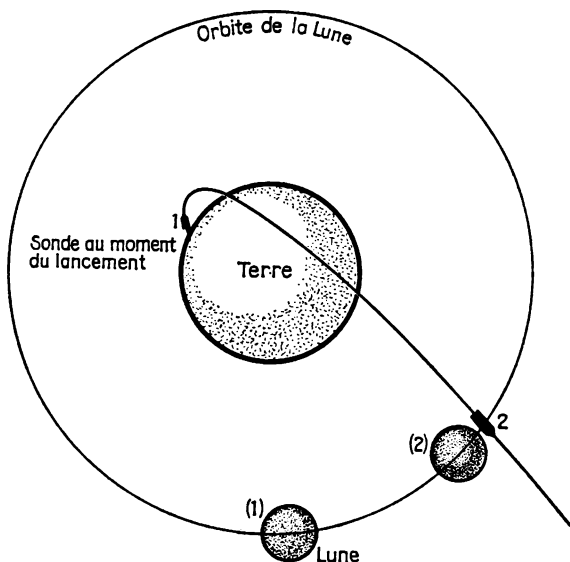


Figure 43. — Sonde lunaire rencontrant la Lune. Au moment du lancement, la Lune est dans la position (1). La sonde doit être lancée de telle façon qu'au moment où la Lune sera dans la position (2) la sonde arrive au même endroit.

* C'est l'astronaute américain Armstrong qui fut le premier homme à marcher sur la Lune, le 20 juillet 1969, au cours de la mission Apollo 11. (N.D.T.)

leurs véhicules au point qu'ils peuvent opérer leur jonction, comme ils l'ont fait dans le projet Gemini, quand un homme peut quitter son véhicule pour « marcher » dans l'espace, quand des sondes peuvent atterrir sur la Lune elle-même, on croit sans peine que l'homme mettra bientôt le pied sur notre satellite *.

Les voyages en fusée vers les planètes.

La Lune n'est pas le seul objectif des astronautes. Vénus a déjà été examinée par des sondes spatiales et les voyages sur les planètes sont possibles, mais on est limité par le temps. Certaines étoiles sont trop éloignées pour que nous puissions espérer les visiter un jour. Vénus et Mars ne se rapprochent jamais à moins d'environ 80 millions de km de la Terre et, si la vitesse que conserve la fusée après avoir quitté le champ de gravitation de la Terre est trop faible, le voyage sera trop long pour des passagers humains. Par exemple, un long voyage implique l'obligation de transporter une grande

* A la date de parution de cet ouvrage en français, le programme Apollo touche à sa fin ; cinq missions ont pleinement réussi et dix hommes ont foulé le sol lunaire (N.D.T.)

quantité de nourriture, ce qui augmente la charge. Supposons qu'il faille, pour atteindre Vénus, un an, durée peut-être plus longue que ce que la plupart d'entre nous pourraient supporter : le véhicule devrait transporter des vivres pour deux ans. Pour obtenir ce résultat, la fusée devrait avoir une vitesse résiduelle, par rapport à la vitesse de libération, d'environ 8 170 km à l'heure.

Quand le véhicule spatial arrive enfin dans la région où l'attraction ne se fait plus sentir, aucune force n'est nécessaire pour le maintenir en mouvement. Un véhicule spatial en dehors du champ gravifique et de l'atmosphère est un excellent exemple de la première loi de Newton. Aucune force n'agit sur lui, il continue donc à se déplacer à la vitesse résiduelle qu'il a conservée au-dessus de la vitesse de libération de 40 000 km à l'heure. Les seules forces à appliquer sont celles nécessaires pour modifier sa direction et des moteurs très légers suffisent pour cela.

L'apesanteur.

Comme nos corps ont évolué dans un milieu où la gravitation existait, la vie en apesanteur ne leur est pas facile. Quand un véhicule spatial est en orbite, la gravitation qui agit sur lui est équilibrée

par la force de réaction centrifuge due à son mouvement. Les passagers peuvent se sentir très mal à l'aise dans cette situation et, si le voyage est long, leurs corps peuvent en souffrir. Dans la cabine, tout ce qui n'est pas fixé se déplace çà et là sans qu'aucune force le maintienne vers le bas ou vers le haut. Cela n'est pas seulement gênant, cela peut être fort dangereux si, par exemple, un morceau de soudure ou une vis se loge dans un endroit où il peut gêner le fonctionnement. Les déplacements dans la cabine sont difficiles. Sur la Terre, la marche dépend du frottement qui, à son tour, dépend de la pesanteur. La « marche » en état d'apesanteur est analogue au patinage sur une glace extrêmement polie : la poussée de votre pied ne rencontre aucun point d'appui. Vous ne pesez rien, puisque le poids est égal à mg , mais vous paraissez tout aussi maigre, ou tout aussi gras. Dans un véhicule spatial qui a quitté la Terre et son champ gravifique, le même problème de l'apesanteur se pose. Quelques publications, dont on a peu parlé, suggèrent que les astronautes russes et américains qui ont été dans l'espace pendant de longues périodes ont souffert de troubles physiques qui ont continué après leur atterrissage. En revanche, les semences réagissent remarquablement bien et poussent beaucoup plus vite que sur Terre. Il faudra une expérience bien plus prolongée de

vols de longue durée en apesanteur avant que nous puissions être sûrs de l'influence de cet état sur le corps humain.

Il semble clair cependant que, pour de longs vols, il faudra fournir aux passagers, d'une façon ou d'une autre, une pesanteur artificielle. Nous avons déjà signalé une méthode possible : le véhicule spatial tourne autour d'un axe de façon que la force centrifuge qui en résulte imite la pesanteur. Il faudra un certain temps pour s'habituer à cette espèce de « gravitation » parce que, par exemple, elle changerait d'un point à l'autre de la cabine. D'autre part, on aurait ainsi un « haut » et un « bas », ce qui pourrait rendre la vie dans l'espace un peu plus facile. Aucun système de pesanteur artificielle n'a été utilisé jusqu'à présent sur les véhicules spatiaux habités.

Comment fonctionne une fusée.

Comme ce livre est consacré à la gravitation et non aux voyages spatiaux, nous ne devons pas nous étendre outre mesure sur la technique, pourtant très intéressante, des fusées. D'autre part, il faut que vous ayez au moins quelque idée de la façon dont fonctionne le moteur d'une fusée : un combustible brûle, ce qui produit des gaz chauds, expulsés

vers l'arrière à grande vitesse. Beaucoup de personnes croient, à tort, que la fusée s'élève parce que les gaz poussent contre la rampe de lancement, puis contre l'air. C'est absolument faux ; de fait, la fusée fonctionne au mieux dans l'espace, là où il n'y a rien sur quoi la poussée puisse s'exercer. Son fonctionnement repose sur le principe dit de la *conservation de la quantité de mouvement* d'après lequel, quand aucune force *extérieure* n'agit sur un système, une certaine quantité, appelée *quantité de mouvement*, ne varie pas. Cette quantité est définie comme le produit de la masse m d'un corps ou d'un système par sa vitesse v dans le cas d'un corps, par la somme vectorielle des vitesses dans le cas d'un système. Ici, le système comprend la fusée et les gaz (voir figure 44). Au début, quand la fusée est au repos sur sa rampe de lancement, la quantité de mouvement est nulle ; elle doit donc rester nulle. Quand les gaz chauds s'échappent, leur quantité de mouvement vers le bas est considérable, parce que, bien que leur masse soit faible, leur vitesse est très élevée. Cette quantité de mouvement vers le bas doit être équilibrée par un déplacement de la fusée vers le haut ; comme elle est beaucoup plus lourde que les gaz, la fusée se déplace beaucoup plus lentement qu'eux, mais elle s'élève et continue à s'élever tant que le moteur fonctionne. Bref, la fusée s'élève

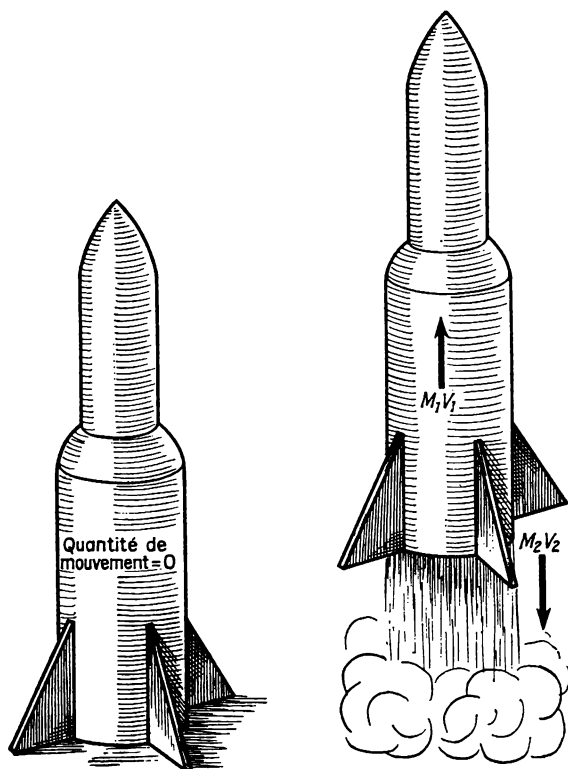


Figure 44. — La fusée s'élève à cause de la conservation de la quantité de mouvement. Avant la mise à feu (dessin de gauche), la quantité de mouvement $M_1 V_1$ de la fusée est nulle; il doit donc en être de même après (dessin de droite). Les gaz chauds ont une quantité de mouvement $M_2 V_2$ dirigée vers le bas, qui doit être équilibrée par une quantité de mouvement égale $M_1 V_1$ de la fusée, dirigée vers le haut ($M_1 V_1 = M_2 V_2$).

parce qu'elle envoie vers le bas un courant gazeux à grande vitesse.

Fusées à plusieurs étages.

Aujourd'hui, il est techniquement impossible de construire une fusée unique, c'est-à-dire une fusée à un seul étage, pouvant atteindre une vitesse suffisante pour se placer en orbite autour de la Terre et encore bien moins atteindre la vitesse de libération requise pour échapper à la gravité terrestre. La difficulté est que, pour atteindre de grandes vitesses, la fusée doit transporter une grande quantité de combustible, de sorte que la charge à accélérer par le moteur est considérable. Pour pouvoir être mise en orbite, une fusée doit transporter une quantité de combustible pesant environ 37 fois tout le reste, y compris le satellite, les instruments et, bien entendu, les réservoirs à combustible ! On est parvenu à tourner cette difficulté grâce à un procédé ingénieux : les fusées multiples, ou à plusieurs étages, formées de plusieurs fusées, chacune d'elles s'allumant quand la précédente s'éteint (voir figure 45). Quand la première fusée, autrement dit le premier étage, cesse de brûler après un certain temps, elle se détache et la charge totale est diminuée d'autant.

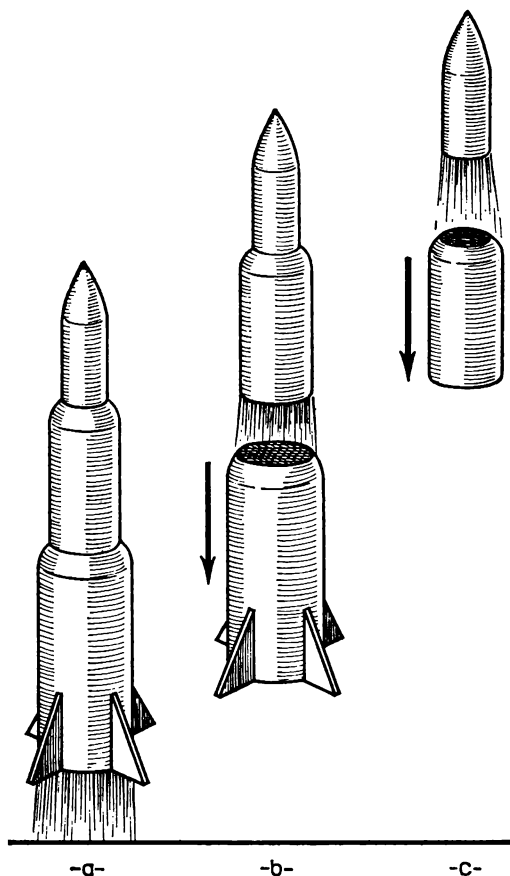


Figure 45. — Une fusée à trois étages. En -a-, la fusée entière décolle. Lorsque le combustible du premier étage cesse de brûler, cet étage est détaché et le deuxième étage s'allume -b-. De même, lorsque le combustible du deuxième étage cesse de brûler, cet étage est détaché, et le troisième et dernier étage s'allume -c-.

Le reste de la fusée continue à s'élever parce que, sur commande, le deuxième étage a été mis à feu et pousse la charge réduite à une altitude encore plus élevée. Lorsqu'il a cessé de brûler, il se détache à son tour. On pourrait ainsi atteindre une vitesse presque illimitée. En pratique, trois étages constituent un bon compromis et suffisent largement pour que la fusée atteigne la vitesse de libération.

Les débris dans l'espace.

Plus de trois cents véhicules spatiaux ont été lancés et ce nombre ne fait que s'accroître. Certains se sont désintégrés sous l'influence de la chaleur dégagée par le frottement au moment de leur rentrée dans l'atmosphère à grande vitesse, mais la plupart sont encore dans l'espace. Ajoutez à ce nombre les étages inférieurs des fusées qui ne se sont pas tous désintégrés et les autres débris, tels que le « cordon ombilical » qui a servi à feu Edward White pour sa « marche » dans l'espace et vous voyez que l'espace « vide » est de plus en plus encombré de débris projetés dans les cieux par l'homme. La devise du XXI^e siècle sera peut-être « Gardez l'espace propre » !

La vitesse de libération et l'atmosphère.

Les véhicules spatiaux ne sont pas les seuls corps qui doivent atteindre une vitesse de 11 200 mètres par seconde pour échapper à l'attraction de la Terre ; il en est de même des molécules de l'air. La Terre conserve son atmosphère pour la simple raison que la vitesse moyenne des molécules de l'air est très inférieure à la vitesse de libération. Les molécules des gaz qui composent l'air sont, comme vous le savez peut-être, en mouvement constant. Leur vitesse augmente avec la température mais, à une température donnée, la vitesse moyenne des molécules de masse m d'un gaz quelconque est fonction de $1/\sqrt{m}$. En d'autres termes, plus la molécule gazeuse est lourde, plus lent est son mouvement. Le plus léger de tous les gaz est l'hydrogène, dont les molécules ont donc la vitesse moyenne la plus élevée, environ 2 000 mètres par seconde, chiffre insuffisant pour permettre de quitter la Terre, mais toutes les molécules n'ont pas la vitesse moyenne : la dispersion par rapport à celle-ci est considérable, de sorte que beaucoup de molécules des deux gaz les plus légers, l'hydrogène et l'hélium, ont des vitesses dépassant la vitesse de libération et ont donc quitté

l'atmosphère définitivement depuis longtemps. Il en résulte que ces deux gaz, quoique très communs dans le reste de l'univers, sont rares dans l'atmosphère terrestre. Dans le cas de gaz comme l'oxygène et l'azote, dont les molécules sont plus lourdes, un bien plus petit nombre de celles-ci atteignent la vitesse de libération et c'est pourquoi ces deux gaz ont été retenus par l'attraction terrestre et constituent la presque totalité de l'atmosphère. Sur la Lune, la vitesse de libération n'est que de 2 400 mètres environ par seconde et

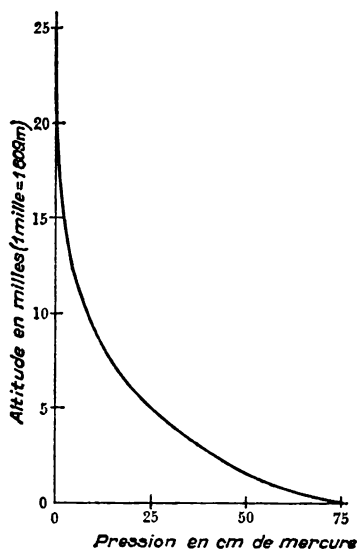


Figure 46. — Courbe de la pression atmosphérique en fonction de l'altitude à une latitude de 45°.

cet astre est donc incapable de conserver une atmosphère.

C'est à cause de la pesanteur que la pression atmosphérique diminue avec l'altitude, comme le montre la figure 46. Le nombre de molécules à une altitude donnée dépend de celle-ci, mais la relation est complexe ; on a pu la déterminer en tenant compte de ce que seules les molécules rapides atteignent une altitude élevée contre la pesanteur et de ce que la répartition des vitesses parmi les molécules suit une loi connue. A une altitude donnée, la densité, et par conséquent la pression dépendent du nombre de molécules à cette altitude, mais il n'est pas nécessaire de reproduire la formule compliquée qui donne la pression en fonction de l'altitude. Les choses sont beaucoup plus claires sur le graphique de la figure 46. La pression diminue quand l'altitude augmente.

CHAPITRE DIX

GRAVITATION ET RELATIVITE

Bien que plus de trois siècles se soient écoulés depuis que Newton a formulé sa loi de la gravitation universelle, et bien que nous ayons pu l'appliquer de toutes les façons qui ont rempli les chapitres précédents, nous n'avons certainement pas fini avec la gravitation. Nous ne savons même pas ce que c'est, ni de quelle façon exacte elle agit à distance sur les corps. Y a-t-il des ondes de gravitation analogues aux ondes électromagnétiques ? Nous ne savons pas non plus quelles conclusions tirer de l'analogie entre les forces de gravitation et les forces électromagnétiques qui, toutes deux, obéissent à la loi de l'inverse du carré des distances entre les corps en action réciproque ; c'est pour nous un supplice de Tantale.

La relativité restreinte.

Après avoir formulé sa théorie de la relativité restreinte (1905), Einstein commença à étudier certains des problèmes que pose la gravitation, ce qui le conduisit à publier en 1916 sa théorie de la relativité généralisée, proposant certaines idées extraordinaires sur ce point ; nous en parlerons dans ce chapitre. La relativité restreinte conduisait à la conclusion que la plus grande vitesse possible dans l'univers est celle de la lumière, c , soit 300 000 km par seconde dans le vide. La relativité restreinte ne considérait que des systèmes de référence se déplaçant à *vitesse (vectorielle) constante* l'un par rapport à l'autre, par exemple un train et la campagne qu'il traverse. Un autre postulat de la relativité restreinte est que les expériences faites dans un système de référence (par exemple le train) donneront le même résultat que celles faites dans un autre système animé d'une vitesse constante par rapport au premier (la gare). Les lois de la physique gardent la même forme quand on change les systèmes de référence, mais les dimensions dans lesquelles elles sont exprimées *changent*. Un objet de longueur L dans le sens du mouvement d'un système se déplaçant à une vitesse v paraîtra à un observateur dans un système stationnaire avoir une longueur plus petite :

$$L' = L \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}$$

et l'inverse est également vrai.

Imaginons le cas improbable, mais (en principe) possible, d'un train traversant une gare à une vitesse de 0,44 fois celle de la lumière c . Les voyageurs du train ont mesuré sa longueur et ont trouvé 100 mètres. Un observateur dans la gare constate que la longueur du train n'est que

$$100 \sqrt{1 - \left(\frac{0,44}{c}\right)^2} = 90 \text{ mètres}$$

Le chef de gare a mesuré la longueur du quai et a également, par coïncidence, trouvé 100 mètres, mais d'après les voyageurs du train, cette longueur n'est que de 90 mètres.

Nous avons dû exagérer pour montrer les effets de la contraction des objets dans le sens de leur mouvement. Pour des corps se mouvant à une vitesse normale, le rapport v^2/c^2 est très petit et la contraction est inobservable, mais, pour des corps se déplaçant à une vitesse voisine de celle de la lumière, — par exemple des particules élémentaires des rayons cosmiques ou des particules accélérées en laboratoire — la contraction relativiste devient importante. Le mouvement relatif affecte, non seulement les longueurs, mais aussi

les temps. Si une horloge se déplace à une vitesse v par rapport à un système stationnaire, les observateurs de ce système constateront que, pour eux, elle retarde. L'intervalle entre un tic-tac de l'horloge mobile et le suivant paraît plus long pour un observateur stationnaire que pour un observateur se déplaçant avec l'horloge et le rapport entre les deux est :

$$\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}$$

Le principe d'équivalence.

Dans sa théorie de la relativité généralisée, Einstein chercha à exprimer les lois de la physique de façon à ce qu'elles puissent être transformées d'un système à un autre en mouvement *accéléré* par rapport au premier. Bien qu'il n'ait jamais réussi complètement à intégrer l'électromagnétisme et la gravitation dans une théorie unifiée, sa relativité généralisée n'en conduit pas moins à des conclusions et des prédictions très intéressantes au sujet de la gravitation. La relativité généralisée repose sur le *principe d'équivalence* d'Einstein, qui peut s'énoncer succinctement comme suit : *Un observateur dans un laboratoire clos est inca-*

pable de distinguer les effets de la gravitation et ceux d'une accélération de son laboratoire. Voyons maintenant ce que cela signifie.

Imaginons un laboratoire clos dans un véhicule spatial flottant en état d'apesanteur dans l'espace extra-atmosphérique (voir figure 47). A l'intérieur, un astronaute tient dans chaque main une boule ; toutes deux ont le même diamètre, mais l'une est en matière plastique et l'autre en plomb. S'il lâche les boules, elles restent où elles sont, puisque aucune force n'agit sur elles. Soudain, mais sans que l'astronaute le sache, la fusée est mise à feu et est soumise à une accélération de 9,8 m par seconde par seconde. Un observateur stationnaire (doté peut-être de la vision en rayons X de Superman) voit quelque chose de curieux. L'homme reste immobile par rapport à nous, tandis que le plancher de sa cabine se déplace vers le haut de plus en plus vite jusqu'à ce qu'il touche ses pieds (ou sa tête s'il flottait la tête en bas dans la cabine). L'astronaute peut rester debout normalement et les objets se trouvant dans la cabine restent en place. Si maintenant l'astronaute lâche les deux boules au même moment, elles se déplaceront vers le haut, de notre point de vue, à la vitesse qu'avait la fusée au moment où elles ont été lâchées, mais, comme la fusée est en mouvement accéléré, le plancher se déplace de plus en plus vite et

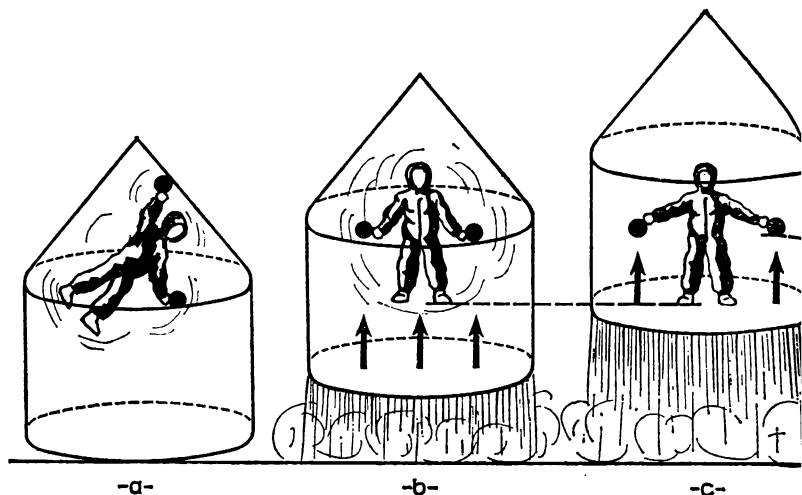
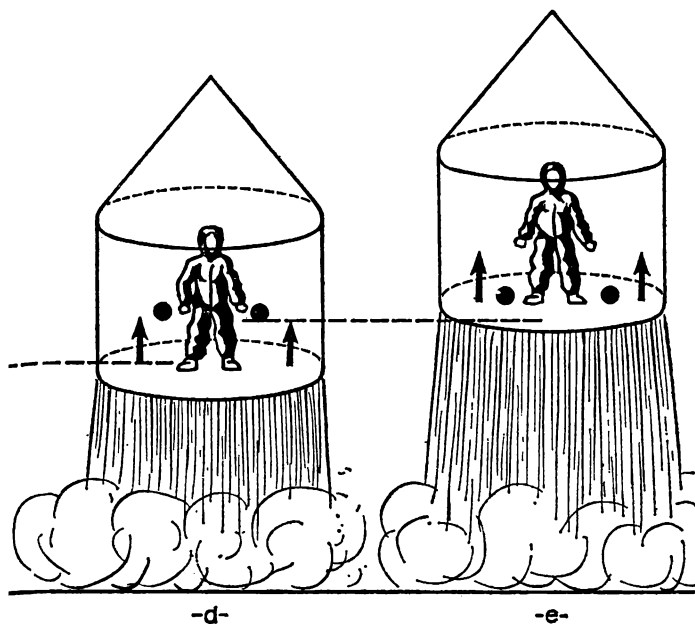


Figure 47. — Le principe d'équivalence d'Einstein. -a- Le véhicule spatial n'accélère pas et l'astronaute « flotte ». -b- La fusée est mise à feu et commence à accélérer, mais l'astronaute n'est pas encore affecté et reste dans la même position *par rapport à nous* pendant que le plancher de la cabine s'élève. -c- Nous voyons l'astronaute toujours dans la même position par rapport à nous (ligne pointillée), mais le plancher a rencontré ses pieds. Il croit être tombé sur le plancher. Un moment plus tard, il lâche deux boules de même diamètre mais de poids inégal, qui acquièrent la vitesse du véhicule au moment où il les lâche. -d- À cause de leur vitesse initiale, les boules se déplacent vers le haut (ligne



pointillée) par rapport à nous, mais, en même temps, la fusée accélérée se déplace plus vite encore vers le haut, de sorte que les boules sont plus proches du plancher que sur l'image précédente. L'astronaute pense qu'elles tombent. -e- Bien que les boules aient continué leur mouvement vers le haut (ligne pointillée), le plancher les a rattrapées toutes les deux en même temps. Pour l'astronaute, elles paraissent être tombées sur le plancher, comme elles le feraient sous l'action de la pesanteur. Il lui est donc impossible de distinguer dans cette situation les effets de l'accélération de ceux de la pesanteur.

rattrape bientôt les deux boules, simultanément. C'est là notre point de vue, mais, pour l'astronaute, la situation est très différente. Il croit que, lorsqu'il a lâché les boules, elles sont tombées et, comme elles ont touché le plancher au même moment, il conclut qu'il se trouve d'une façon ou d'une autre revenu sur la Terre et qu'une force égale à la pesanteur terrestre agit sur lui et sur la cabine. Il n'a absolument aucun moyen de savoir s'il se trouve dans un laboratoire en mouvement accéléré ou s'il est affecté par la pesanteur. Même si l'accélération de la fusée n'était pas de 9,8 mètres par seconde par seconde, l'astronaute ne serait pas plus avancé car, après tout, l'intensité de la pesanteur n'est de 9,8 mètres par seconde par seconde qu'au voisinage de la surface terrestre ; ailleurs, sa valeur est différente.

Si nous ne pouvions rien tirer d'autre du principe d'équivalence que le résultat ci-dessus, il serait intéressant mais sans grande portée. On pourrait vous pardonner de dire « et alors ? ». Or, d'après Einstein, le principe d'équivalence s'applique non seulement à la mécanique, mais aussi à l'étude des phénomènes électromagnétiques, y compris la lumière. Pour comprendre comment il pouvait imaginer que la lumière, supposée dénuée de masse, soit susceptible d'être affectée par la gravitation — ce qui est une idée vraiment extraordi-

naire — il nous faut remonter un peu en arrière dans le temps.

Les quanta.

En 1900, le physicien Max Planck constata qu'il était en mesure d'expliquer certaines caractéristiques du rayonnement du corps noir (le rayonnement produit par des corps assez chauds pour émettre de la chaleur) s'il imaginait que ce rayonnement était envoyé dans l'espace non d'une façon continue, mais sous forme de bouffées distinctes d'énergie, appelés *quanta*. Planck fut plutôt troublé que satisfait, parce qu'il ne pouvait pas prendre au sérieux cette idée. James Clerk Maxwell avait établi la théorie ondulatoire de la lumière sur des bases très solides dans la seconde moitié du XIX^e siècle et, depuis cette époque, personne n'avait nié que toutes les radiations électromagnétiques (ondes lumineuses, ondes radio-électriques, rayons X, etc.) soient transmises par des ondes comme celles que vous voyez dans la figure 48. Planck considérait sa solution comme une espèce d'astuce mathématique, sans aucune validité physique. Un autre phénomène qui intriguait les physiciens à cette époque était ce qu'on appelle l'effet photo-électrique. Einstein se rendit compte qu'il pouvait expliquer toutes

les caractéristiques de cet effet s'il prenait au sérieux la proposition de Planck. C'est de là que partit la célèbre théorie des quanta, devenue depuis la mécanique quantique sur laquelle repose toute la physique moderne. Chose curieuse, Einstein ne crut jamais complètement aux conclusions vers lesquelles tendait la mécanique des quanta et Planck resta effrayé par le développement de son idée.

L'apparition de la théorie des quanta donnait le choix aux physiciens entre deux théories de la lumière. D'après l'une, la lumière et tous les rayonnements électromagnétiques seraient émis sous forme d'ondes continues, comme celles de la figure 48, qui transfèrent l'énergie d'une façon continue. Pour l'autre, l'énergie lumineuse serait émise par paquets distincts, les quanta. L'une des théories est-elle exacte et l'autre fausse ? En réalité, on ne peut « choisir » entre les deux ; toutes deux sont correctes. La théorie ondulatoire explique certaines caractéristiques de la lumière, la théorie des quanta en explique d'autres. La lumière a à la fois une nature ondulatoire et une nature particulaire. Dans cet exposé, nous nous intéressons surtout au point de vue particulaire sous la forme des particules associées aux quanta qu'on appelle les *photons*.

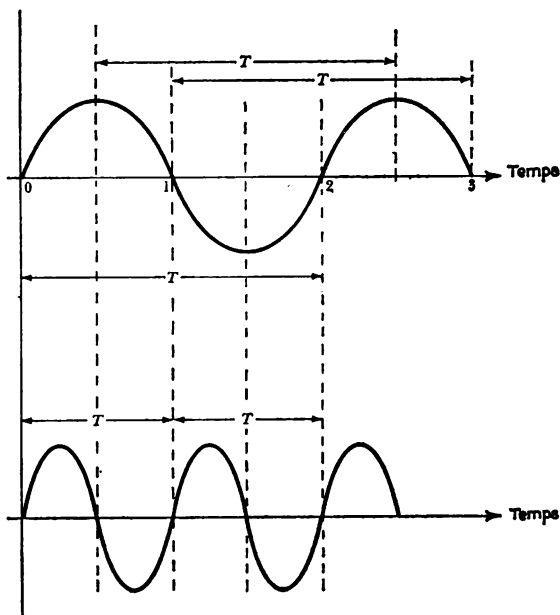


Figure 48. — Une onde. L'intervalle de temps nécessaire à l'onde pour un *cycle* complet, c'est-à-dire pour revenir à sa hauteur originelle, est appelé sa *période* et représenté par T . Comme indiqué dans le premier dessin, on peut compter cette période à partir d'un point quelconque de l'onde jusqu'au moment où l'onde revient à la même position, par exemple d'une crête maximale à l'autre, d'une crête minimale à l'autre, d'une ordonnée nulle à l'autre. La crête maximale atteinte par l'onde est appelée son *amplitude* et le nombre de cycles par unité de temps (en général par seconde) est sa *fréquence*, qu'on représente par f . Vous voyez que, comme la seconde onde accomplit deux cycles pendant le temps nécessaire à la première pour un seul, la fréquence de la seconde est double de celle de la première.

Le photon.

Chaque photon transporte un quantum d'énergie. Jusqu'ici, nous avons employé le mot énergie d'une façon vague, sans le définir. Le physicien appelle énergie l'aptitude à fournir un *travail* et il définit le travail comme le produit d'une force par la distance dont son point d'application s'est déplacé. Un corps possède l'énergie cinétique $mv^2/2$ s'il est en mouvement ; il peut aussi, par exemple s'il se trouve au bord d'une falaise, posséder une *énergie potentielle* égale à mgH , où H est la hauteur de la falaise. Cette énergie potentielle peut se transformer en travail quand le corps tombe, par exemple quand l'eau tombe sur la roue d'un moulin. Il existe aussi d'autres formes d'énergie. L'énergie E transportée par un quantum dépend de la fréquence f du photon et la relation est :

$$E = hf$$

où h est ce qu'on appelle la constante de Planck.

La fréquence est une propriété commune à toutes les ondes. Pendant un *cycle*, une onde atteint une valeur de crête maximale, tombe à zéro, descend jusqu'à une valeur de crête minimale inférieure à zéro, puis revient à zéro, comme dans la figure 48. Le nombre de cycles en un temps donné

est ce qu'on appelle la *fréquence* de l'onde. C'est la fréquence d'une onde lumineuse qui détermine sa couleur. Aux deux extrémités opposées du spectre visible se trouvent le bleu et le rouge, qui correspondent respectivement aux fréquences les plus élevées et les plus basses. Il est curieux de constater que nous pouvons nous servir d'un mot comme « fréquence », qui concerne les ondes, en parlant d'un photon, qui est une particule. Comment une particule peut-elle avoir une fréquence ? Il est impossible de donner à cette question une réponse simple. De par la nature de la mécanique quantique, ses résultats mathématiques ne correspondent pas à une image physique claire. Nous pouvons dire que la fréquence du photon est celle de l'onde qui pourrait aussi servir à décrire la même radiation électromagnétique.

La masse du photon.

Une conséquence de la relativité restreinte que nous n'avons pas encore signalée est l'accroissement relativiste de la masse. Pour un observateur stationnaire, une masse en mouvement paraît plus grande que la même masse au repos et le rapport entre les deux est :

$$\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}$$

Pour une particule légère pouvant atteindre de grandes vitesses, cet accroissement est quelquefois énorme : un électron se mouvant à la vitesse, qui n'est pas rare, de 0,99 fois celle de la lumière paraît avoir une masse égale à *sept fois* sa « masse au repos », c'est-à-dire sept fois la masse qu'il aurait s'il était au repos par rapport à l'observateur. A partir de cette expression, Einstein a obtenu un résultat étonnant, la fameuse formule :

$$E = mc^2$$

Si un corps de masse m est entièrement détruit, il se transforme en une quantité d'énergie égale à sa masse, multipliée par le carré de la vitesse de la lumière ! La masse et l'énergie sont entièrement équivalentes. Cette théorie a été confirmée par l'explosion de la première bombe atomique, où la matière était transformée en une quantité d'énergie inimaginable pour ceux qui ignoraient l'équivalence de la masse et de l'énergie.

Inversement, l'énergie est égale à la masse. Un photon, qui n'a pas de masse au repos, a, grâce à son énergie, une masse égale à E/c^2 . Quelques alinéas plus haut, nous avons dit que l'énergie

d'un photon est égale à hf ; il en résulte que la masse du photon est :

$$m = \frac{hf}{c^2}$$

Comme une masse est associée au photon, celui-ci — et par conséquent la lumière — doit être influencé par la gravitation ! Bien que cette extraordinaire conclusion soit difficile à admettre, nous pouvons revenir à notre fusée imaginaire pour envisager une situation où cela semble, après tout, raisonnable.

La déviation de la lumière.

L'astronaute est toujours dans la cabine où l'air est devenu très poussiéreux, de sorte que, lorsqu'un faisceau de lumière le traverse, il est facilement visible, grâce à sa réflexion sur les grains de poussière. Imaginons maintenant que la vitesse de la lumière soit beaucoup moindre que sa valeur réelle. Au début de l'expérience, la cabine n'est pas accélérée et le faisceau lumineux la traverse en ligne droite. Ensuite, on allume la fusée. Que devient le trajet du faisceau lumineux ? Pour cela, regardez la figure 49. Nous avons tracé des droites de référence, invisibles pour le passager, qui mon-

trent le point atteint par le faisceau à des intervalles de temps égaux. Pendant la première période, le plancher de la fusée a commencé à s'élever et, comme le montre le dessin, le faisceau touche notre premier repère en *a*, plus près du plancher qu'à son point de départ. Pendant le second intervalle, le plancher s'élève davantage et le faisceau atteint le deuxième repère au point *b*. Quand le faisceau atteint le troisième repère, il touche le plancher. C'est comme cela que *nous* voyons la situation, mais l'homme dans la cabine a un point de vue tout différent. Il pense que le rayon lumineux est incurvé et, dans son système de référence, il *est* incurvé. Dans notre système de référence, la lumière a décrit une ligne droite. Si la lumière peut être incurvée dans un système accéléré, elle peut l'être aussi par l'influence de la gravitation !

Nous devons avouer que le degré de déviation est très exagéré dans notre dessin afin que l'effet soit visible. En fait, la vitesse de la lumière est si grande que, quand elle parcourt une distance aussi minime que la largeur d'une cabine, sa déviation est presque nulle et l'astronaute ne pourrait certainement pas la constater. La déviation de la lumière par la gravitation est très faible, ce qui explique pourquoi elle n'a été observée que lorsque les scientifiques ont commencé à rechercher ce

phénomène. L'angle de déviation α d'un faisceau lumineux à une distance R du centre d'un corps de masse M est donné par la formule :

$$\alpha = \frac{4GM}{c^2 R}$$

L'angle α est exprimé en radians ; il y a 2π radians dans un cercle, de sorte qu'un radian vaut

$$\frac{360^\circ}{2\pi}$$

soit 57,3 degrés. G est la constante de la gravitation et c la vitesse de la lumière. La déviation provoquée par le Soleil devrait être d' 1,75 seconde d'arc, ce qui n'est pas grand-chose si vous vous souvenez qu'il y a 3 600 secondes dans un degré. Le Soleil est trop brillant pour que, d'ordinaire, nous puissions voir la lumière des étoiles qui passe près de lui, incurvée ou non. C'est seulement quand le disque solaire est obscurci au cours d'une éclipse de Soleil — et les éclipses sont rares — que nous pouvons vérifier si la lumière des étoiles est déviée ou non. Pour cela, on photographie des étoiles dont la lumière passe près du bord du disque solaire pendant l'éclipse et on compare les clichés avec d'autres pris six mois plus tôt, quand le Soleil paraît être dans la partie opposée du ciel, moment où la déviation de la

LA GRAVITATION

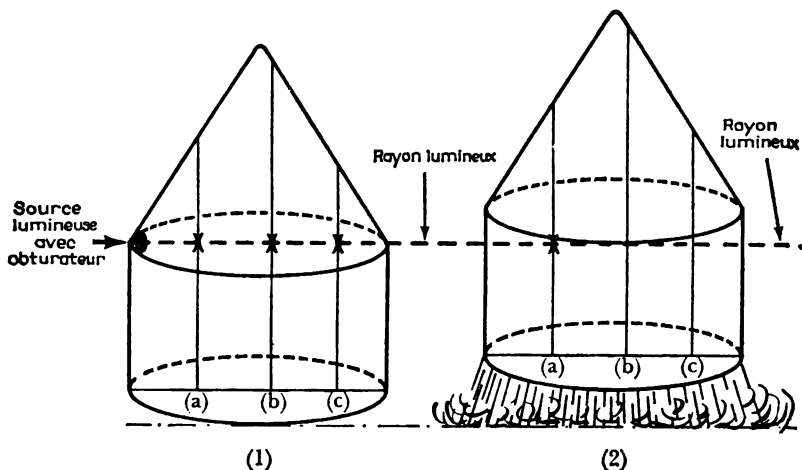
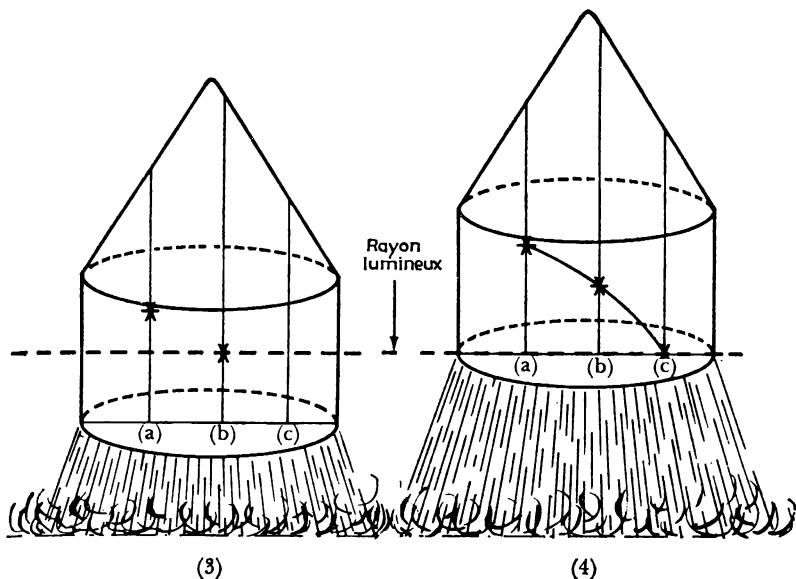


Figure 49. — L'incurvation de la lumière dans un système de référence accéléré. Les droites (a) (b) et (c) représentent des écrans transparents sur lesquels on marque la position du rayon lumineux.

(1) La fusée n'est pas accélérée. Un rayon lumineux traverse la cabine en ligne droite.

(2) La fusée s'allume et l'accélération commence. Un rayon lumineux transmis au moment de la mise à feu se déplace en ligne droite *dans notre système de référence* et arrive à l'écran (a) au moment où la fusée est dans la position (2). Entre-temps, la fusée s'est élevée, de sorte que le rayon lumineux atteint l'écran (a) au point indiqué, plus près du plancher que dans le dessin (1).



(3) Le rayon lumineux continue à se déplacer en ligne droite pour nous et atteint l'écran (b) en un point plus proche du plancher que celui où il a atteint l'écran (a), parce que le plancher s'est déplacé vers le haut.

(4) Lorsque le rayon lumineux arrive à l'écran (c), la fusée s'est élevée à un tel point qu'il est au niveau du plancher, comme nous le voyons de l'extérieur. Une personne placée dans la cabine qui réunirait les points marqués sur les écrans, verrait que la courbe est une parabole et conclurait que, dans un système accéléré, la trajectoire d'un rayon lumineux est une parabole.

lumière sur ces mêmes étoiles est minimale. Si la lumière des étoiles est effectivement déviée quand elle passe près du Soleil, les positions apparentes des étoiles doivent être différentes. Les observations faites montrent en effet une déviation à peu près égale à celle prévue par la théorie, mais, jusqu'à présent, il y a eu trop peu d'éclipses et nous ne disposons pas d'assez de données pour démontrer nettement qu'Einstein avait raison.

Des physiciens du Massachusetts Institute of Technology ont récemment cherché à vérifier d'une autre façon la théorie de la relativité généralisée. Pendant deux périodes où le Soleil se trouvait entre la Terre et Mercure, ils ont envoyé sur cette planète des ondes de radar (voir figure 50). Si la théorie d'Einstein est exacte, la déviation de ces ondes au moment où elles passent près du Soleil allonge la durée de leur trajet aller et retour de $1/5\,000$ de seconde. Le signal réfléchi étant très faible, la mesure était fort difficile, mais les savants ont cependant réussi à mesurer le retard, qui était en effet d'environ $1/5\,000$ de seconde, juste avant que Mercure passe derrière le Soleil. Comme l'exactitude de cette expérience préliminaire n'était que d'environ 20 %, les résultats ne sont pas encore considérés comme concluants, mais les améliorations de la technique devraient nous permettre bientôt de déterminer une fois pour

toutes si oui ou non les ondes électromagnétiques sont déviées dans un champ de gravitation.

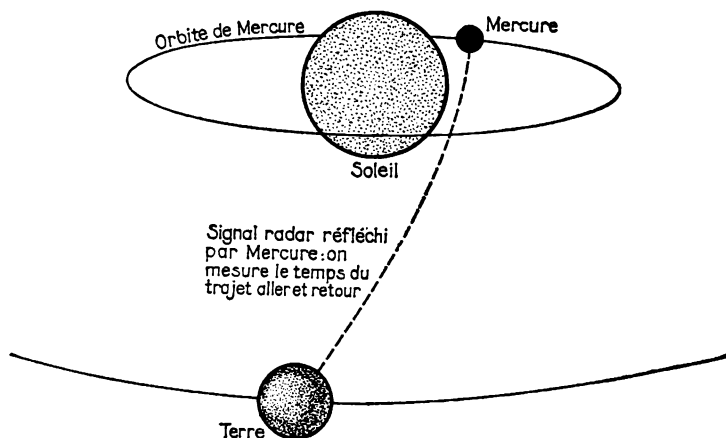


Figure 50. — La déviation d'une onde électromagnétique par le champ de gravitation du Soleil. Une onde de radar envoyée sur Mercure quand cette planète est voisine du Soleil est déviée par l'attraction gravifique du Soleil. La trajectoire est donc plus longue, et le temps nécessaire à la parcourir est également plus long. Les premiers résultats des mesures de cet écart concordent bien avec les valeurs tirées de la théorie de la relativité généralisée d'Einstein.

La déviation de la lumière par la gravitation permettra peut-être d'expliquer l'existence de ces bizarreries célestes appelées les *quasars*. Ce qu'ils ont d'étrange, c'est qu'ils sont *trop* brillants. Personne n'a répondu d'une façon satisfaisante à la

question qui se pose : d'où vient l'énergie qui leur permet d'avoir un rayonnement électromagnétique aussi intense ? Une suggestion intéressante, faite très récemment, est que les quasars ne seraient pas, après tout, très brillants. Ce pourraient être des galaxies ordinaires de luminosité normale, dont la lumière a été déviée et concentrée par la présence entre le quasar et nous d'un corps très lourd — peut-être une autre galaxie. La seconde galaxie jouerait le rôle de lentille pour concentrer la lumière émise par le quasar et pourrait le faire paraître jusqu'à 300 milliards de fois plus brillant qu'il n'est !

Le déplacement vers le rouge dû à la gravitation.

Un corps lourd n'incurve pas seulement la lumière ; il peut aussi modifier sa fréquence ; cet effet est connu sous le nom de *déviatio*n vers le rouge due à la gravitation. Un photon quitte la surface d'un corps avec une certaine énergie hf . Il consomme de l'énergie dans sa lutte pour se libérer du champ gravifique du corps et lorsqu'il s'en dégage, il n'a plus qu'une énergie plus faible hf' et une fréquence plus faible, f' . La réduction de la fréquence correspond à un déplacement du

spectre vers le rouge, d'où le nom donné à cet effet, qu'il ne faut pas confondre avec le *déplacement vers le rouge dû à l'effet Döppler*. Celui-ci se produit dans la lumière émise par un objet s'éloignant de l'observateur, de même que la tonalité musicale du sifflet d'un train varie suivant qu'il s'approche ou qu'il s'éloigne.

Les scientifiques ont recherché ce déplacement dû à la gravitation, dont la présence ou l'absence peut fournir une vérification, dont on a grand besoin, de la relativité généralisée. On l'a observé dans la lumière d'étoiles très massives appelées les naines blanches. On a obtenu au laboratoire une mesure plus précise de ce déplacement en laissant « tomber » des ondes électromagnétiques de très haute fréquence, appelées rayons gamma, sur une distance de plusieurs mètres et la variation de fréquence observée concorde avec la prédiction d'Einstein.

La courbure de l'espace.

Autrefois, les physiciens définissaient la ligne droite comme la trajectoire d'un rayon lumineux dans le vide. En quoi cette définition est-elle affectée par la découverte de la déviation de la lumière par la gravitation ? Einstein disait que

l'espace lui-même était courbé dans la région entourant un objet lourd, de sorte que la lumière suit en réalité le chemin le plus court entre deux points sur la surface courbe de l'espace. Comme vous le savez, la plus courte distance entre deux points d'un globe terrestre n'est pas représentée, sur une carte ordinaire, par une ligne droite entre ces deux mêmes points. Sur la sphère, cette plus courte distance est un arc de ce qu'on appelle un « grand cercle ». De même, la projection dans notre monde fait que la lumière paraît avoir une trajectoire courbe, alors qu'elle se déplace en ligne droite dans l'espace déformé.

Les gravitons.

La théorie de la relativité généralisée prédit entre autres que des masses en mouvement accéléré doivent émettre des ondes de gravitation, comme les charges électriques en mouvement accéléré émettent des ondes électromagnétiques et, de même que les radiations électromagnétiques sont quantifiées en particules appelées photons, ces ondes de gravitation peuvent être quantifiées en particules appelées *gravitons*. Jusqu'ici, on n'a observé ni ondes de gravitation ni gravitons. Leur détection n'est pas facile, parce que la force de gravita-

tion est très faible si on la compare par exemple à la force électrique d'attraction entre corps chargés. Néanmoins, on prouvera peut-être un jour leur existence.

Nous sommes arrivés à la fin de notre étude de la gravitation qui, aujourd'hui encore, n'est pas complète. Einstein n'a pu pousser sa théorie jusqu'à une conclusion satisfaisante ; beaucoup des questions qu'il a soulevées sont restées sans réponse. Malgré les travaux de nombreux spécialistes de la physique théorique, la théorie de la gravitation n'a guère avancé depuis Einstein. Nous restons étrangement mal à l'aise, tourmentés par des questions sans réponse. Est-il possible que nous ne sachions jamais exactement s'il existe une relation — et laquelle — entre la gravitation et l'électromagnétique, que nous ne sachions jamais comment la force de la gravitation est transmise d'un corps à un autre ? Il est plus probable qu'un indice sera fourni par une source inattendue, peut-être une discipline différente. A partir de cet indice, les spécialistes de la physique théorique pourront peut-être donner une vie nouvelle à l'étude de la gravitation et arriver enfin à une théorie unifiée de la gravitation et de l'électromagnétisme.

CHAPITRE ONZE

TOUTES LES MATHÉMATIQUES NECESSAIRES POUR COMPRENDRE CE LIVRE

1. Notation et termes mathématiques.

Dans le langage des mathématiques, certains symboles conventionnels signifient qu'il faut effectuer certaines opérations mathématiques. Vous connaissez peut-être déjà un grand nombre ou la totalité d'entre eux ; de toute façon, la « traduction » française ci-dessous pourra vous être utile. Les définitions sont accompagnées d'exemples.

POUR COMPRENDRE CE LIVRE

MULTIPLICATION

$2a$	signifie 2 fois a .
$2ab$	signifie 2 fois a fois b .
$2(a + b)$	signifie $2a + 2b$, c'est-à-dire 2 fois a plus 2 fois b .
$2(a - b)$	signifie $2a - 2b$, c'est-à-dire 2 fois a moins 2 fois b .
3×10^2	signifie 3 fois le carré de 10, c'est-à-dire $3 \times 100 = 300$.

DIVISION

$\frac{a}{b}$	signifie a divisé par b .
a/b	signifie a divisé par b .
$\frac{a + b}{2}$	signifie la somme de a et de b divisée par 2 ou, ce qui revient au même, $a/2 + b/2$.
$\frac{a - b}{2}$	signifie $a/2 - b/2$.

EXPOSANTS

a^1	$=$	a .
a^2	$=$	a fois $a = a$ au carré.
a^3	$=$	a fois a fois $a = a$ au cube.

LA GRAVITATION

$a^4 = a$ fois a fois a fois $a = a$ à la 4^e puissance et ainsi de suite.

$a^{1/2} = \sqrt{a}$ est appelé la racine carrée de a .

$a^{1/3} = \sqrt[3]{a}$ est appelé la racine cubique de a .

$a^{1/4} = \sqrt[4]{a}$ est appelé la racine quatrième de a .

$a^{-1} = 1/a^1$ est appelé l'inverse de a .

$a^{-2} = 1/a^2$ est appelé l'inverse du carré de a .

$a^{-3} = 1/a^3$ est appelé l'inverse du cube de a .

$a^{-4} = 1/a^4$ est appelé l'inverse de la 4^e puissance de a .

CALCUL DES EXPOSANTS

Pour multiplier un nombre — a par exemple — élevé à une puissance par le même nombre élevé à une autre puissance (ou à la même), vous *ajoutez* les exposants, comme indiqué ci-dessous. Il peut vous sembler étrange d'ajouter pour multiplier, mais les exemples ci-dessous devraient suffire à vous convaincre :

$$a^2 \times a^3 = (a \times a) (a \times a \times a) = a \times a \times a \times a \times a = a^5.$$

Vous pouvez vérifier directement, par exemple pour $a = 2$

$$2^2 \times 2^3 = 4 \times 8 = 32$$

et

$$2^5 = 2 \times 2 \times 2 \times 2 \times 2 = 32.$$

$$a^3 \times a^{-1} = a^2 \text{ parce que } 3 + (-1) = 2.$$

Ici encore, la vérification directe est facile. Pour $a = 3$

$$3 \times 3 \times 3 \times 1/3 = 9 = 3^2.$$

$$a^{1/2} \times a^{1/2} = a^1 = a.$$

Pour $a = 9$, $a^{1/2} = 3$ et on a :

$$a^{1/2} \times a^{1/2} = 3 \times 3 = 9 = a.$$

Pour diviser un nombre affecté d'un exposant par le même nombre affecté d'un exposant, on soustrait le second exposant du premier, comme indiqué ci-dessous.

$$\frac{a^5}{a^3} = a^2$$

$$\frac{a^6}{a^4} = a^2$$

$$\frac{a^{1/2}}{a^{1/4}} = a^{1/4}$$

$$\frac{a^{-8}}{a^{-10}} = a^2$$

$$\frac{a^6}{a^{-4}} = a^{10}$$

LA GRAVITATION

Pour élever à une puissance un nombre affecté d'un exposant, on *multiplie* les exposants l'un par l'autre :

$$(a^3)^2 = a^3 \times 2 = a^6.$$

Pour vérifier qu'il en est bien ainsi, il suffit d'expliciter :

$$\begin{aligned}(a^3)^2 &= (a \times a \times a) (a \times a \times a) \\ &= a \times a \times a \times a \times a \times a \\ &= a^6.\end{aligned}$$

PUISSANCES DE 10

Dans les exemples ci-dessus, la lettre *a* peut représenter n'importe quel nombre, mais, dans notre système décimal, il est commode d'employer les puissances de 10 pour exprimer les nombres très grands ou très petits, comme suit :

$$10^0 = 1$$

$$10^1 = 10$$

$$10^2 = 100$$

$$10^3 = 1\,000$$

$$10^4 = 10\,000$$

$$10^5 = 100\,000$$

$$10^6 = 1\,000\,000 = 1 \text{ million}$$

$$10^7 = 10\,000\,000$$

$$10^8 = 100\,000\,000$$

POUR COMPRENDRE CE LIVRE

$$10^9 = 1\,000\,000\,000 = 1 \text{ milliard}$$

$$10^{-1} = 1/10 = 0,1$$

$$10^{-2} = 1/100 = 0,01$$

$$10^{-3} = 1/1\,000 = 0,001$$

et ainsi de suite.

Un nombre très grand ou très petit peut s'exprimer sous la forme d'une puissance convenable de 10 multipliée par un coefficient. Exemples :

$$3\,100 = 3,1 \times 10^3$$

$$62\,500 = 6,25 \times 10^4$$

$$7\,012\,000 = 7,012 \times 10^6$$

$$0,0015 = 1,5 \times 10^{-3}.$$

INDICES

Les indices servent à indiquer les quantités et s'écrivent comme ceci : T_1, T_2, T_3 ou v_x, v_y . Remarquez que les indices sont toujours écrits *au-dessous* de la ligne et qu'on ne peut donc les confondre avec les exposants qui sont au-dessus de la ligne.

RAPPORT

Le rapport de deux nombres est le quotient du premier par le second. Le rapport de a à b est a/b .

LA GRAVITATION

PROPORTIONNALITÉ

Si deux quantités variables x et y sont liées de telle façon que quand on double x , y double, quand on triple x , y triple, quand on divise x par 2, y est divisé par 2 et ainsi de suite, nous disons que x est *directement proportionnel* à y . Cela peut s'écrire :

$$x = cy$$

ou

$$\frac{x}{y} = c$$

c étant la constante de proportionnalité. La dernière formule vous montre que si vous doublez x , vous devez aussi doubler y pour que c ne varie pas.

Il n'en est pas de même quand une variable est directement proportionnelle à une *puissance* quelconque de l'autre variable. Vous en avez un exemple p. 53 de ce livre. La distance d parcourue par un corps qui tombe est proportionnelle au carré du temps de chute, soit t^2 . Si nous doublons t , pour conserver l'égalité entre d/t^2 et k nous devons multiplier t , non par 2, mais par $\sqrt{2}$.

Une troisième situation est celle où, quand une variable augmente, l'autre diminue ; c'est ce qu'on appelle la proportionnalité inverse. Un cas simple se présente quand, si l'on double une des variables,

l'autre est divisée par 2, si l'on triple l'une, l'autre est divisée par 3, si l'on quadruple l'une, l'autre est divisée par 4 et ainsi de suite, ce qui s'exprime par la formule :

$$a = \frac{C}{b}$$

où C est une constante. Le type de proportionnalité inverse que vous rencontrez le plus souvent dans ce livre est la proportionnalité à l'inverse du *carré*, ce qui s'exprime par la formule :

$$a = \frac{K}{b^2}$$

Dans notre cas de la p. 84, la force mutuelle d'attraction gravifique F entre deux corps dont les centres sont distants de r est :

$$F = \frac{m_1 m_2 G}{r^2}$$

La variable F est proportionnelle à l'inverse du carré de la variable r . La constante est formée du produit de trois constantes, m_1 , m_2 et G .

2. L'algèbre.

L'algèbre repose sur l'égalité entre les deux membres d'une équation. La chose essentielle à se rappeler pour effectuer les opérations algébriques est que les deux membres d'une équation doivent toujours rester égaux. Ce que vous faites à l'un des membres, vous devez le faire à l'autre en les traitant tous deux avec une impartialité complète.

Pour résoudre par rapport à une inconnue, en général représentée par une lettre, on effectue sur une équation diverses opérations afin d'amener l'inconnue à être *seule* dans un membre, tous les autres symboles et tous les nombres étant dans l'autre membre. Cela peut quelquefois être très difficile, mais, dans ce livre, les solutions sont toutes faciles. Voici quelques exemples d'équations simples et de la façon de les résoudre.

RÉSOLUTION PAR SOUSTRACTION

$$\begin{array}{rcl}
 a + 15 & = & 30 \\
 a + 15 - 15 & = & 30 - 15 \\
 a + 0 & = & 15 \\
 a & = & 15
 \end{array}$$

Soustrayez 15 de chacun des deux membres de l'équation.

POUR COMPRENDRE CE LIVRE

RÉSOLUTION PAR ADDITION

$$\begin{aligned} b - 7,5 &= 6,5 \\ b - 7,5 + 7,5 &= 6,5 + 7,5 \\ b &= 14 \end{aligned}$$

Ajoutez 7,5 à chacun des deux membres de l'équation.

RÉSOLUTION PAR DIVISION

$$\begin{aligned} 30 \ c &= 60 \\ \frac{30}{30} \ c &= \frac{60}{30} \\ c &= 2 \end{aligned}$$

Divisez par 30 chacun des deux membres de l'équation.

RÉSOLUTION PAR MULTIPLICATION

$$\begin{aligned} \frac{d}{10} &= 9 \\ \frac{d}{10} \times 10 &= 9 \times 10 \\ d &= 90 \end{aligned}$$

Multipliez chacun des deux membres par 10.

RÉSOLUTION PAR ÉLÉVATION AU CARRÉ

$$\begin{aligned} \sqrt{x} &= 9 \\ x &= 9 \times 9 \\ x &= 81 \end{aligned}$$

Elevez au carré chacun des deux membres.

LA GRAVITATION

RÉSOLUTION EN COMBINANT PLUSIEURS DES MÉTHODES CI-DESSUS

$y + 22 = 12 y$ $22 = 12 y - y$ $22 = 11 y$ $y = 2$	Faites passer tous les y dans le second membre en soustrayant y de chaque membre, puis divisez les deux membres par 11.
---	--

$\frac{z - 10}{5} = 25$ $z - 10 = 125$ $z = 135$	Multipliez les deux membres par 5, puis ajoutez 10 à chaque membre.
--	--

$9 \frac{(a + 1)}{15} = 12 a$ $9 (a + 1) = 180 a$ $a + 1 = 20 a$ $1 = 19 a$ $a = \frac{1}{19}$	Multipliez les deux membres par 15, puis divisez les deux membres par 9, puis faites passer tous les a dans le second membre en soustrayant a de chaque membre.
--	--

MULTIPLICATION EN CROIX

$$\frac{A}{B} = \frac{C}{D} \quad \text{Multipliez les deux membres par } B$$

$$A = \frac{BC}{D} \quad \text{Multipliez les deux membres par } D$$

$AD = BC$ Vous voyez que le résultat est le même que si vous aviez multiplié en croix les quatre quantités, comme indiqué ci-contre (en d'autres termes, dans une proportion, le produit des extrêmes est égal au produit des moyens). Cette façon de faire permet de gagner du temps quand l'équation à résoudre est une égalité entre deux fractions.

$$\frac{A}{B} \begin{array}{c} \nearrow \searrow \\ \nwarrow \nearrow \end{array} \frac{C}{D}$$

TABLE

INTRODUCTION	5
Chapitre I	
LE TRIOMPHE DU SOLEIL	7
Chapitre II	
L'ELLIPSE	25
Chapitre III	
LA CHUTE DES CORPS	41
Chapitre IV	
LA GRAVITATION UNIVERSELLE	62
Chapitre V	
LA GRAVITATION ET LE SYSTÈME SOLAIRE	85
Chapitre VI	
LA MESURE DE L'INTENSITÉ DE LA PESANTEUR	105
Chapitre VII	
LA BALISTIQUE	119
Chapitre VIII	
LES MARÉES ET LA PRÉCESSION DES ÉQUINOXES	136
Chapitre IX	
LES SATELLITES DE LA TERRE	160
Chapitre X	
GRAVITATION ET RELATIVITÉ	183
Chapitre XI	
TOUTES LES MATHÉMATIQUES NÉCESSAIRES POUR COMPRENDRE CE LIVRE	208

**Achevé d'imprimer le 24 octobre 1975
sur les Presses du Regional Service Center
à Beyrouth-Liban**

**n'est pas facile d'étudier la g
nous est trompeusement famil
nts, dès les premières années d
étrange phénomène « qui fa
ses ». C'est la plus faible des for
s reconnues par les savants et c
qui maintient la cohésion de l'u
a gravitation est en réalité la fo
elle tous les corps s'attirent r
raison directe de leur masse
se du carré de leur distance
ulation à laquelle ont abouti pl
cherche et les travaux de sava
que Galilée, Newton, Kepler, T
stein. Il reste encore pourtant bi
a question qui n'ont pas encore
rie des gravitons, par exemple
ées à venir apporteront-elles la
In petit résumé des notions
spensables à la compréhension
de la gravitation termine cet**